

ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ

ΣΧΟΛΗ ΜΗΧΑΝΟΛΟΓΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ

ΤΟΜΕΑΣ ΡΕΥΣΤΩΝ

ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

Παναγιώτης Μόσχος

**"Αριθμητική ανάλυση της επίδρασης των τοιχωμάτων της
αεροσήραγγας σε αεροδυναμικές μετρήσεις"**

**"Computational analysis of blockage effects in closed loop wind
tunnel tests"**

Επιβλέπων καθηγητής: Σπυρίδων Βουτσινάς, Καθηγητής Ε.Μ.Π

ΑΘΗΝΑ, ΟΚΤΩΒΡΙΟΣ 2016

Σύνοψη

Η παρούσα διπλωματική εργασία με τίτλο "Αριθμητική επίδραση των τοιχωμάτων της αεροσήραγγας σε αεροδυναμικές μετρήσεις" μελετά υπολογιστικά την επίδραση που έχουν τα τοιχώματα μιας αεροσήραγγας στις αεροδυναμικές μετρήσεις που παίρνουμε σε αυτήν. Το μοντέλο που μελετάται είναι η αεροτομή με όνομα NACA 63418. Αρχικά μελετάται η επίδραση των τοιχωμάτων της σήραγγας στις δύο, και αργότερα στις τρεις διαστάσεις. Με τη χρήση του ANSYS/ICEM CFD υπολογίζουμε τα αεροδυναμικά μεγέθη(συντελεστής άνωσης και αντίστασης,κατανομή της πίεσης,ταχύτητες) πάνω στην αεροτομή όταν αυτή είναι εκτεθειμένη σε ελεύθερο ρεύμα αέρα. Το χωρίο που περιλαμβάνει την αεροτομή και μέσα στο οποίο γίνεται η δημιουργία του πλέγματος και οι μετρήσεις, είναι κυκλικό και βρίσκεται σε απόσταση 50 φορές τη χορδή της αεροτομής(Thomas and Sales,1986), μέγεθος ικανοποιητικό, έξω του οποίου ο αέρας δεν επηρεάζεται από την ύπαρξη της αεροτομής. Αργότερα υπολογίζουμε τα αεροδυναμικά μεγέθη μέσα στο θάλαμο δοκιμών της σήραγγας και η σύγκριση με τα προηγούμενα θα δώσει το μέγεθος της επίδρασης που έχουν τα τοιχώματα επί των μετρήσεων. Σκοπός μας φυσικά όπως είπαμε είναι να εξετάσουμε αυτήν την επίδραση στις δύο αλλά και στις τρεις διαστάσεις. Σημαντικό να αναφερθεί πως η θεωρία δίνει εμπειρικούς τύπους διόρθωσης των μεγεθών και η εγκυρότητα τους θα ελεγχθεί στις δύο αλλά και στις τρεις διαστάσεις. Τέλος θα προκύψουν βασικά συμπεράσματα επί της έρευνας με σκοπό να δημιουργηθεί ένα υπολογιστικό εργαλείο που θα δέχεται εύκολα πλέγματα για το μοντέλα (συνήθως αεροτομές) που εξετάζεται πειραματικά στο εργαστήριο.

Ευχαριστίες

Από την θέση αυτή θα ήθελα να εκφράσω την ευγνωμοσύνη μου στον επιβλέποντα καθηγητή της διπλωματικής μου εργασίας Σπυρίδων Βουτσινά για την δυνατότητα που μου έδωσε να ασχοληθώ και να προβληματιστώ με το θέμα της διπλωματικής μου εργασίας. Επίσης θα ήθελα να ευχαριστήσω ιδιαίτερα τον μεταδιδακτορικό ερευνητή Μαρίνο Μανωλέσσο για την υπομονή, και την συνεχή βοήθεια του σε όλο αυτό το διάστημα, καθώς επίσης και την νέα γνώση που μου έδωσε. Ευχαριστίες θα ήθελα επίσης να δώσω στους διδάκτορες Κωνσταντίνο Διακάκη και Γιώργο Παπαδάκη οι οποίοι μου έδωσαν χρήσιμη βοήθεια, καθώς και στην μητέρα μου για την υποστήριξη της όλα αυτά τα χρόνια των σπουδών μου στο ΕΜΠ.

Στον Πατέρα μου.

Πίνακας Περιεχομένων

Κεφάλαιο 1 Εισαγωγή	5
1.1 Διορθώσεις στην αεροσήραγγα	5
1.2 Είδη διορθώσεων	7
1.3 Στόχοι της παρούσας μελέτης	9
Κεφάλαιο 2 Μεθοδολογία	10
2.1 Γενική μεθοδολογία	10
2.2 Μαθηματικό ένθετο	10
2.2.1 Εξισώσεις RANS(Reynolds Averaged Navier Stokes)	10
2.2.2 Μοντέλο τύρβης Spalart-Allarmas	12
Κεφάλαιο 3 Αποτελέσματα	14
3.1 Μελέτη εξάρτησης πλέγματος για μια αεροτομή. Δημιουργία πολικού διαγράμματος για $Re=1.5 \cdot 10^6$	14
3.1.1 Περιγραφή	14
3.1.2 Αποτελέσματα	15
3.1.3 Συμπεράσματα	21
3.2 Δημιουργία πλέγματος για την αεροτομή μέσα στην σήραγγα	21
3.2.1 Περιγραφή	21
3.2.2 Αποτελέσματα	26
3.2.3 Συμπεράσματα	38
3.3 Σύγκριση των διαφορών του πλέγματος με και χωρίς τις διορθώσεις. Πως αυτές οι διαφορές συγκρίνονται με τις διορθώσεις των τοιχωμάτων της βιβλιογραφίας;	39
3.3.1 Περιγραφή	39
3.3.2 Αποτελέσματα	41
3.3.3 Συμπεράσματα	42
3.4 Τριδιάστατη ανάλυση των πλεγμάτων 50 χορδών και σήραγγας	43
3.4.1 Τριδιάστατη ανάλυση του πλέγματος της σήραγγας	43
3.4.2 Τριδιάστατη ανάλυση του πλέγματος των 50 χορδών	59
3.4.2.1 Περιγραφή	59
3.4.2.2 Αποτελέσματα	59

3.4.2.3 Συμπεράσματα	61
3.4.3 Σύγκριση μεταξύ των πλεγμάτων σήραγγας και 50 χορδών στις τρεις διαστάσεις	61
3.4.3.1 Περιγραφή.....	61
3.4.3.2 Αποτελέσματα	62
3.4.3.3 Συμπεράσματα	73
3.4.4 Σύγκριση με πειραματικά δεδομένα.....	74
3.4.4.1 Περιγραφή.....	74
3.4.4.2 Αποτελέσματα	74
3.4.4.3 Συμπεράσματα	75
Κεφάλαιο 4 Συμπεράσματα	75

Κεφάλαιο 1 Εισαγωγή

1.1 Διορθώσεις στην αεροσήραγγα

Η αεροσήραγγα είναι ένα εργαλείο που χρησιμοποιείται στην αεροδυναμική έρευνα προκειμένου να μελετήσει τις επιδράσεις που δέχεται ένα αντικείμενο προς μελέτη(πρότυπο μοντέλο) από τον διερχόμενο αέρα. Η αεροσήραγγα αποτελείται από το κυρίως τμήμα της που καλείται θάλαμος δοκιμών και είναι το τμήμα αυτό που περιλαμβάνει το αντικείμενο που μελετάται, το κομμάτι που προηγείται του θαλάμου δοκιμών και καλείται ακροφύσιο και είναι το κομμάτι εκείνο που ο αέρας διαμέσου του επιταχύνεται και το κομμάτι που έπεται του θαλάμου δοκιμών που καλείται διαχύτης και είναι το τμήμα αυτό στο οποίο γίνεται ανάκτηση της πίεσης , και μείωση της ταχύτητας του αέρα.

1.2 Είδη διορθώσεων

Η αεροσήραγγα αποτελείται από τοιχώματα τα οποία επιδρούν στα μετρούμενα αποτελέσματα πάνω στο μοντέλο. Έτσι οι αεροσήραγγες δεν μπορούν να παράγουν πεδία ροής όμοια με τα πραγματικά.

Τα πεδία ροής της αεροσήραγγας διαφέρουν από τα πραγματικά λόγω διαφόρων παραγόντων. Αυτές οι διαφορές υποχρεώνουν να εφαρμοστούν διορθώσεις στις μετρήσεις που παίρνουμε από την αεροσήραγγα.

Το είδος και ο αριθμός των διορθώσεων εξαρτώνται από το εάν η προσομοιωμένη ροή είναι διδιάστατη ή τριδιάστατη. Σε διδιάστατα πειράματα, το μοντέλο τοποθετείται ανάμεσα σε δύο επίπεδες πλάκες ώστε να αναγκάζεται η ροή να είναι όσο το δυνατόν διδιάστατη. Υπάρχουν διάφοροι παράγοντες που υποχρεώνουν να πραγματοποιηθούν διορθώσεις στις μετρήσεις. Οι πιο σημαντικοί εξ' αυτών είναι οι ακόλουθοι:

- οριζόντια άνωση
- Παρεμπόδιση εκτοπίσματος
- Παρεμπόδιση ομόρρου
- Καμπυλότητα των γραμμών της ροής

Οριζόντια άνωση

Προκαλείται από το γεγονός πως λόγω των ορίων και των τοιχωμάτων αναπτύσσεται οριακό στρώμα πάνω στα τοιχώματα του θαλάμου δοκιμών.

Η ανάπτυξη του οριακού στρώματος έχει σαν αποτέλεσμα να μειώνεται η ενεργός διατομή απ την οποία διέρχεται ο αέρας κατά μήκος του θαλάμου δοκιμών. Έτσι η ροή επιταχύνεται, προκαλώντας μια μείωση στην τιμή της στατικής πίεσης. Ως εκ τούτου, μοντέλα με μεγάλη μετωπική επιφάνεια δέχονται μια δύναμη που τα 'σπρώχνουν προς τα πίσω'.

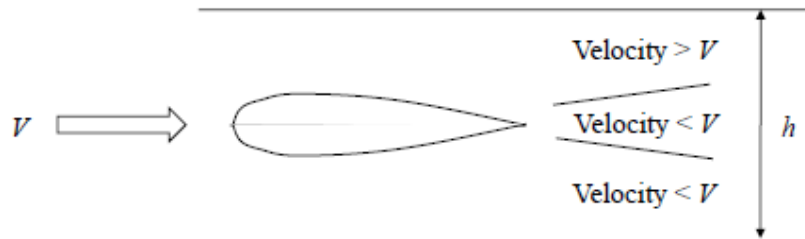
Ουσιαστικά αυτός ο παράγοντας αυξάνει την αεροδυναμική αντίσταση που δέχεται το μοντέλο.

Παρεμπόδιση εκτοπίσματος

Η παρουσία ενός μοντέλου μέσα στο θάλαμο δοκιμών μειώνει την περιοχή μέσω της οποίας μπορεί ο αέρας να κινηθεί. Η ταχύτητα του αέρα αυξάνεται γύρω από το μοντέλο. Αυτό το φαινόμενο καλείται solid

blockage και μπορεί να διορθωθεί αυξάνοντας την σχετική ταχύτητα του αέρα μέσα στη αεροσήραγγα.

Παρεμπόδιση ομόρρου



Η ταχύτητα του αέρα στον ομόρρου του μοντέλου πρέπει να είναι μικρότερη της ταχύτητας του ελεύθερου ρεύματος αέρα V . Σε έναν κλειστό αγωγό αυτό σημαίνει πως η ταχύτητα του αέρα έξω από τον ομόρρου πρέπει να είναι μεγαλύτερος της ταχύτητας V προκειμένου η παροχή μάζας να είναι ίδια σε κάθε θέση (ικανοποίηση της εξίσωσης συνέχειας). Η συγκεκριμένη επίδραση μπορεί να αποφευχθεί αποτελεσματικά χρησιμοποιώντας μια αύξηση της ταχύτητας του αέρα.

Καμπυλότητα των γραμμών της ροής

Η οροφή και το πάτωμα του θαλάμου δοκιμών τεχνητά ευθυγραμμίζουν την καμπυλότητα των γραμμών ροής γύρω από το μοντέλο. Το μοντέλο εμφανίζεται να έχει περισσότερο κύρτωμα απ' ότι πραγματικά έχει, δηλαδή έμφανίζει μεγαλύτερη δύναμη άνωσης. Αυτή η επίδραση απαιτεί διορθώσεις στους παρακάτω τρεις παράγοντες:

- γωνία πρόσπτωσης
- συντελεστή άνωσης, και
- συντελεστή ροπής

1.3 Στόχοι της παρούσας μελέτης

Σκοπός της παρούσας εργασίας είναι να εξετάσουμε την εγκυρότητα των υπάρχοντων διορθωτικών τύπων που προσφέρει η θεωρία στο γραμμικό και στο μη γραμμικό τμήμα του πολικού διαγράμματος, ώστε να μπορέσουμε να προβούμε σε συμπεράσματα σχετικά με το εάν οι διορθώσεις αυτές προσεγγίζουν την πραγματική καμπύλη, δηλαδή τη καμπύλη που αντιστοιχεί στην αεροτομή όταν αυτή είναι εκτεθειμένη σε ελεύθερο ρεύμα αέρα.

Κεφάλαιο 2 Μεθοδολογία

2.1 Γενική μεθοδολογία

Μελετήθηκε υπολογιστικά η ροή στο θάλαμο δοκιμών της αεροσήραγγας του ΕΜΠ. Για το σκοπό αυτόν χρησιμοποιήθηκε ο κώδικας MaPFlow που έχει αναπτυχθεί στο εργαστήριο και αρχικά μελετήθηκε η επίδραση των τοιχωμάτων, του συγκλίνοντος και του αποκλίνοντος τμήματος της σήραγγας (διαχύτης) σε δύο καθώς και σε τρεις διαστάσεις. Στη συνέχεια με βάση τα αποτελέσματα δημιουργήθηκε ένα τμηματικό πλέγμα το οποίο μπορεί να δέχεται εύκολα πλέγματα για τα μοντέλα (συνήθως αεροτομές) που εξετάζονται πειραματικά στο εργαστήριο. Κατά τη διάρκεια της διπλωματικής εργασίας έγινε χρήση των προγραμμάτων ANSYS/ICEM, του κώδικα MaPFlow και του προγράμματος Tecplot.

Με τη χρήση του προγράμματος ANSYS/ICEM CFD γίνεται διακριτοποίηση του χώρου γύρω από την αεροτομή (πτέρυγα στις 3 διαστάσεις) παράγοντας έτσι πλέγματα. Αυτά τα πλέγματα εισάγονται στον κώδικα MaPFlow και επιλύονται σε αυτά οι βασικές εξισώσεις RANS(Reynolds Averaged Navier Stokes) που αποτελούν τη πιο γενική περιγραφή της ροής ενός ρευστού δίνοντας τα πεδία ροής και σημαντικά αεροδυναμικά μεγέθη από τα οποία προκύπτουν διαγράμματα. Τα πιο σημαντικά εξ' αυτών είναι οι συντελεστές άνωσης και αντίστασης c_l και c_d αντίστοιχα, η κατανομή της πίεσης γύρω από την αεροτομή ή τη πτέρυγα και οι ταχύτητες της ροής στις τρεις διαστάσεις. Τέλος το μοντέλο τύρβης που χρησιμοποιήθηκε είναι το μοντέλο Spalart-Allmaras(SA-model).

2.2 Μαθηματικό ένθετο

2.2.1 Εξισώσεις RANS(Reynolds Averaged Navier Stokes)

Οι εξισώσεις Navier Stokes για ασυμπίεστη ροή σε διατηρητική μορφή είναι :

$$\frac{\partial u_i}{\partial x_j} = 0 \quad (1)$$

$$\rho \frac{\partial u_i}{\partial t} + \rho \frac{\partial}{\partial x_j} (u_i u_j) = -\frac{\partial P}{\partial x_j} + \frac{\partial}{\partial x_j} (2\mu s_{ij}) \quad (2)$$

Όπου ο τανυστής s_{ij} δίνεται από τον τύπο:

$$s_{ij} = \frac{1}{2} \left(\frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \right) \quad (3)$$

Από την εφαρμογή της εξίσωσης (1) ,η εξίσωση της κίνησης μπορεί να γραφτεί

$$\rho \frac{\partial u_i}{\partial t} + \rho u_j \frac{\partial u_i}{\partial x_j} = -\frac{\partial P}{\partial x_i} + \mu \frac{\partial^2 u_i}{\partial x_i \partial x_j} \quad (4)$$

Σε τυρβώδεις ροές οι ιδιότητες του πεδίου γίνονται τυχαίες εξισώσεις του χώρου και του χρόνου. Ως εκ τούτου οι μεταβλητές του πεδίου u_i και P πρέπει να εκφραστούν ως το άθροισμα ενός όρου που αφορά τη μέση τιμή του μεγέθους και ενός που αφορά τη διακύμανση του στο χρόνο:

$$u_i = U_i + u'_i \text{ και } p = P + p' \quad (5)$$

Όπου οι παραπάνω όροι ικανοποιούν :

$$\overline{u_i} = U_i, \quad \overline{u'_i} = 0 \quad (6)$$

$$\overline{p} = P, \quad \overline{p'} = 0 \quad (7)$$

Εισάγοντας την εξίσωση (5) στις εξισώσεις (1) και (2) και παίρνουμε τις χρονικά μέσες εξισώσεις Navier Stokes γνωστές και ως RANS (Reynolds Averaged Navier Stokes) εξισώσεις:

$$\frac{\partial U_i}{\partial x_i} = 0 \quad (8)$$

$$\rho \frac{\partial U_i}{\partial t} + \rho \frac{\partial}{\partial x_j} (U_i U_j) = -\frac{\partial P}{\partial x_i} + \frac{\partial}{\partial x_j} (2\mu S_{ij} - \rho \overline{u'_i u'_j}) \quad (9)$$

Όπου ο τανυστής S_{ij} δίνεται από τον τύπο

$$S_{ij} = \frac{1}{2} \left(\frac{\partial U_i}{\partial x_j} + \frac{\partial U_j}{\partial x_i} \right) \quad (10)$$

Η ποσότητα $\tau_{ij} = -\overline{u'_i u'_j}$ είναι γνωστή ως τανυστής τάσεων Reynolds, ο οποίος είναι συμμετρικός και ως εκ τούτου αποτελείται από 6 συνιστώσες. Από την εφαρμογή της εξίσωσης (8), η εξίσωση (9) μπορεί να εκφραστεί ως:

$$\frac{\partial U_i}{\partial t} + U_j \frac{\partial U_i}{\partial x_j} = -\frac{\partial P}{\partial x_i} + \nu \frac{\partial^2 U_i}{\partial x_i \partial x_j} - \frac{\partial \overline{u'_i u'_j}}{\partial x_j} \quad (11)$$

Διαχωρίζοντας τις ποσότητες u και p σε μέσους όρους και όρους διακύμανσης, εισήχθηκαν τρεις άγνωστες ποσότητες. Δυστυχώς, οι εξισώσεις δεν είναι τόσες όσοι και οι άγνωστοι. Πρέπει λοιπόν να βρούμε τόσες εξισώσεις που αν επιλυθούν να δώσουν τους αγνώστους. Γι αυτό το λόγο υπάρχουν διάφορες προσεγγίσεις (μοντέλα τύρβης) που λύνουν τις εξισώσεις RANS.

2.2.2 Μοντέλο τύρβης Spalart-Allmaras

Προσέγγιση του Boussinesq: Οι τάσεις Reynolds στην εξίσωση (11) πρέπει να μοντελοποιηθούν. Μια κοινή υπόθεση χρησιμοποιεί την υπόθεση Boussinesq για να συσχετίσει τις τάσεις Reynolds με τις κλίσεις της μέσης ταχύτητας

$$-\overline{u'_{ij}u'_{ij}} = 2\nu_T S_{ij} - \frac{2}{3}k\delta_{ij} \quad (12)$$

Όπου η τυρβώδης κινητική ενέργεια k , ορίζεται ως

$$k = \frac{1}{2} \overline{u'_{ij}u'_{ij}} \quad (13)$$

Και η ποσότητα ν_T είναι το κινητικό ιξώδες, ένα βαθμωτό μέγεθος.

Spalart-Allmaras Model

Στο μοντέλο τύρβης Spalart-Allmaras το κινητικό ιξώδες δεν υπολογίζεται, οπότε ο τελευταίος όρος στην εξίσωση (12) αγνοείται όταν υπολογίζονται οι τάσεις Reynolds

$$\overline{u'_{ij}u'_{ij}} = 2\nu_T S_{ij} \quad (14)$$

Το μοντέλο αυτό περιλαμβάνει οχτώ συντελεστές και τρεις εξισώσεις. Οι εξισώσεις που την καθορίζουν είναι

$$\nu_T = \bar{\nu} f_{u1} \quad , \quad f_{u1} = \frac{x^3}{x^3 + C_{u1}^3} \quad , \quad x = \frac{\bar{\nu}}{\nu} \quad (15)$$

Όπου η ποσότητα ν είναι το μοριακό ιξώδες και το μέσο $\bar{\nu}$ υπακούει στις εξισώσεις μεταφοράς

$$\frac{\partial \bar{\nu}}{\partial t} + U_j \frac{\partial \bar{\nu}}{\partial x_j} = C_{b1} + \frac{1}{\sigma} \frac{\partial}{\partial x_k} [(\nu + \bar{\nu}) \frac{\partial \bar{\nu}}{\partial x_k}] + \frac{C_{b2}}{\sigma} \frac{\partial \bar{\nu}}{\partial x_k} \frac{\partial \bar{\nu}}{\partial x_k} - C_{w1} f_w \left[\frac{\bar{\nu}}{d} \right]^2$$

Όπου

$$C_{b1} = 0.1355, C_{b2} = 0.622, C_{u1} = 7.1, \sigma = 2/3, C_{w1} = \frac{C_{b1}}{k^2} + \frac{(1 + C_{b2})}{\sigma}$$

$$C_{w2}=0.3, C_{w3}=2, k=0.41, f_{u2}=1-\frac{x}{1+xf_{u1}}, f_w=q[\frac{1+C_{w3}^2}{g^6+C_{w3}^6}]^{1/6}$$

$$g=r+C_{w2}(r^6-r), r=\frac{\bar{v}}{Sk^2d^2}, \bar{S}=S+\frac{\bar{v}}{k^2d^2}f_{u2}, S=\sqrt{2\Omega_{ij}\Omega_{ij}}$$

Ο τανυστής $\Omega_{ij} = \frac{1}{2}(\frac{\partial U_i}{\partial x_j} - \frac{\partial U_j}{\partial x_i})$ ονομάζεται περιστρεφόμενος τανυστής και d είναι η απόσταση από την κοντινότερη επιφάνεια.

Κεφάλαιο 3 Αποτελέσματα

3.1 Μελέτη εξάρτησης πλέγματος για μια αεροτομή. Δημιουργία πολικού διαγράμματος για $Re=1.5*10^6$

3.1.1 Περιγραφή

Δημιουργούμε ένα Ο-τύπου πλέγμα στο κέντρο του οποίου είναι τοποθετημένη η αεροτομή NACA 63418. Το όριο του πλέγματος αυτού το οποίο είναι το όριο έξω από το οποίο δεν γίνονται υπολογισμοί εκτείνεται σε ακτίνα 50 φορές την χορδή της αεροτομής από το σημείο ($X=0, Y=0.35, Z=0$). Το σύστημα συντεταγμένων έχει αρχή ($X=0, Y=0, Z=0$) το πρώτο σημείο στην ακμή πρόσπτωσης της αεροτομής. Έξω από το όριο αυτό η ταχύτητα του αέρα είναι ίση με την ταχύτητα του ελεύθερου ρεύματος του αέρα και ουσιαστικά η επίδραση που έχει η παρουσία της αεροτομής στη περιοχή αυτή είναι αμελητέα. Το εσωτερικό του ορίου το οποίο αποτελεί το υπολογιστικό πεδίο είναι η περιοχή η οποία επηρεάζεται άμεσα από την ύπαρξη της αεροτομής. Εδώ η ταχύτητα του αέρα παύει να είναι ίση με αυτή του ελεύθερου ρεύματος του αέρα και γίνεται σαφώς μικρότερη. Το είδος και ο αριθμός των κελιών που θα απαρτίζουν το πλέγμα θα πρέπει να είναι τέτοιο ώστε η ακρίβεια των αποτελεσμάτων να είναι αρκετά ικανοποιητική, δηλαδή σχετικό σφάλμα μικρότερο της μονάδας, και προφανώς με τον ελάχιστο αριθμό κόμβων ώστε να μειωθεί το υπολογιστικό κόστος.

Μόλις δημιουργηθεί το πλέγμα τότε στρέφουμε την αεροτομή σε γωνίες πρόσπτωσης από -5 έως 20 μοίρες όπου στη κάθε μια εξ αυτών

υπολογίζονται τα αεροδυναμικά μεγέθη και τελικώς παίρνουμε το διάγραμμα των συντελεστών c_l , c_d συναρτήσει της γωνίας πρόσπτωσης.

3.1.2 Αποτελέσματα

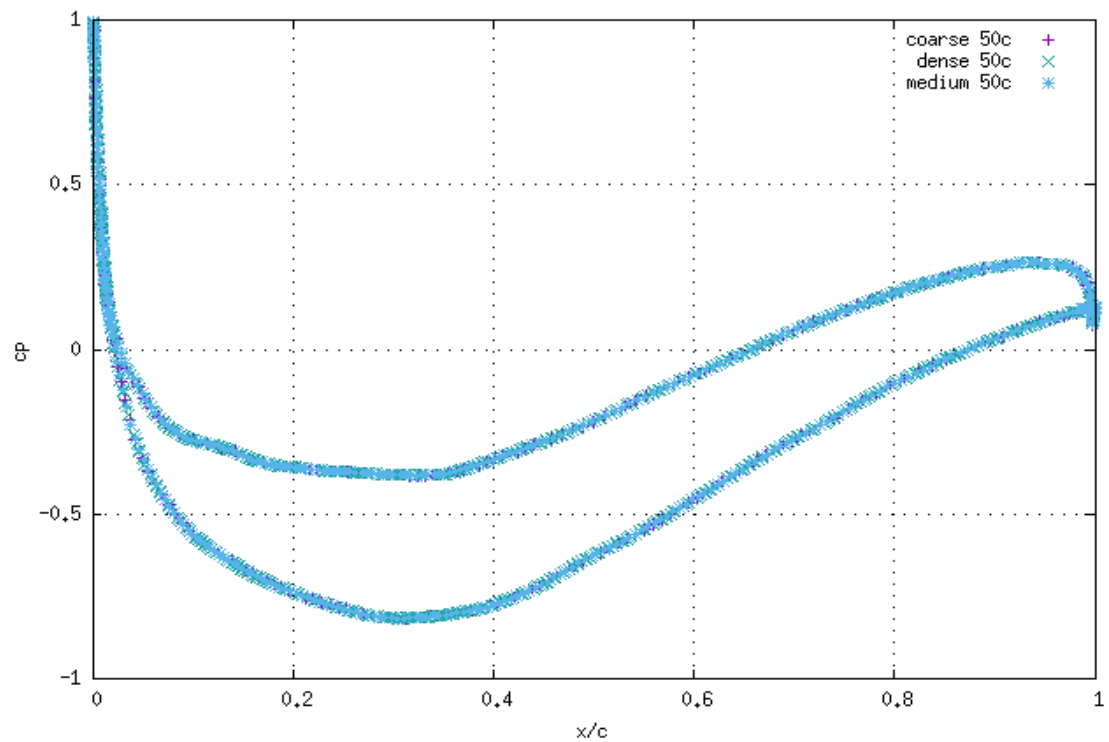
3.1.2.1 Ανεξαρτησία πλέγματος

- Δημιουργούμε το πλέγμα στις 50 χορδές με 60500 κόμβους και του δίνουμε το όνομα `medium_50c`.
- Στη συνέχεια το ίδιο πλέγμα το πυκνώνουμε και δημιουργούμε το πλέγμα με 121410 κόμβους με όνομα `dense_50c`.
- Τέλος δημιουργούμε και ένα πιο αραιό πλέγμα με 31146 κόμβους με όνομα `coarse_50c`.

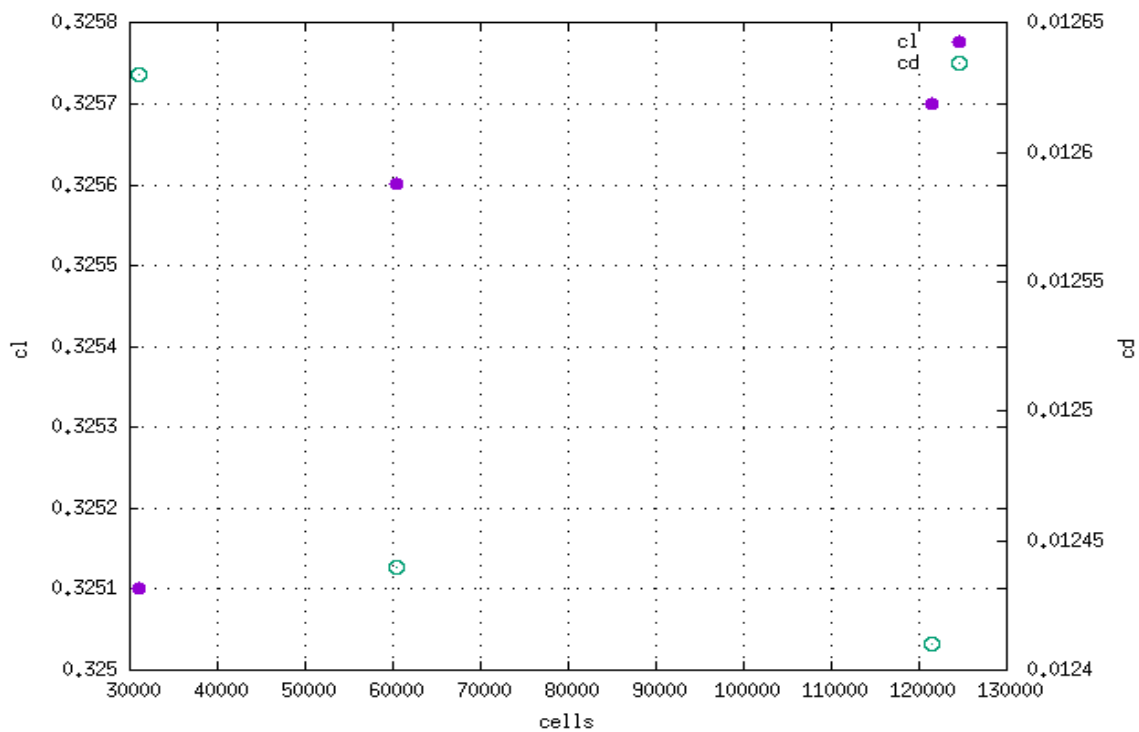
Παρακάτω έχουμε συνοπτικά:

	κελιά	c_l	c_d	err(%)- c_l	err(%)- c_d
medium_50c	60500	0.3256	0.01244		
coarse_50c	31146	0.3251	0.01263	0.15	1.52
dense_50c	121410	0.3257	0.01241	0.03	0.24

Στον παραπάνω πίνακα οι τιμές των συντελεστών άνωσης και αντίστασης έχουν προκύψει σε μηδενική γωνία πρόσπτωσης και για τις τρεις περιπτώσεις πυκνότητας πλέγματος



Εικόνα 3.1.1-Διάγραμμα κατανομής της πίεσης για την αεροτομή με όριο 50 χορδές για τρεις περιπτώσεις πλεγμάτων,ένα πυκνό με όνομα dense 50c ,ένα αραιό με όνομα coarse 50c και ένα πλέγμα ανάμεσα στα δύο με όνομα medium 50c.



Εικόνα 3.1.2-Διάγραμμα των συντελεστών άνωσης c_l και αντίστασης c_d για τρεις περιπτώσεις πυκνότητας πλέγματος,μια με 31146 κελιά,μια με 60500 κελια και μια με 121410 κελιά.

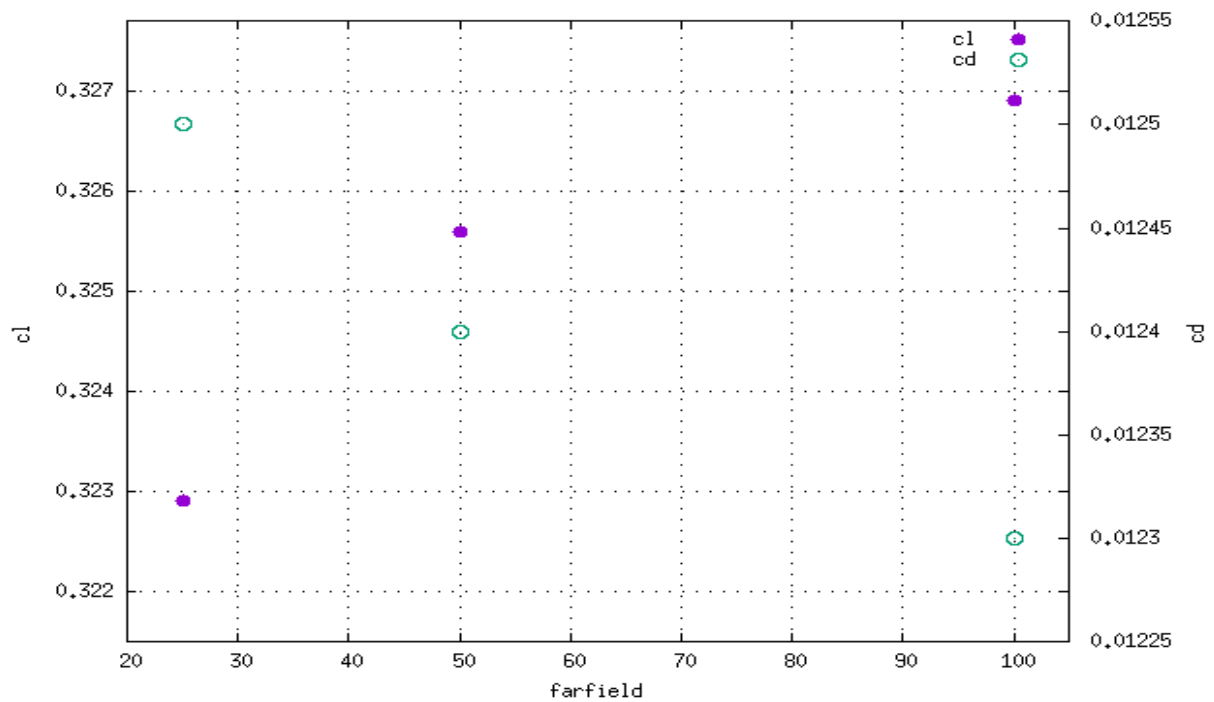
Παρατηρώντας την εικόνα 3.2.1 μπορούμε να πούμε πως, αν αραιώσουμε το πλέγμα **medium_50c**, το σφάλμα για το **cd** είναι μεγαλύτερο του 1. Επίσης αν πυκνώσουμε το πλέγμα το σχετικό σφάλμα των **cl**, **cd** είναι μικρότερο της μονάδας. Επομένως κρατάμε το πλέγμα **medium_50c** που είναι το πλέγμα με 60500 κελιά. Τέλος το ίδιο συμπεραίνουμε όταν δούμε την εικόνα 3.1.1, που μας δείχνει πως η κατανομή της πίεσης πάνω στην αεροτομή δεν μεταβάλλεται με την μεταβολή του αριθμού των κελιών.

3.1.2.2 Ανεξαρτησία ορίου υπολογιστικού πεδίου

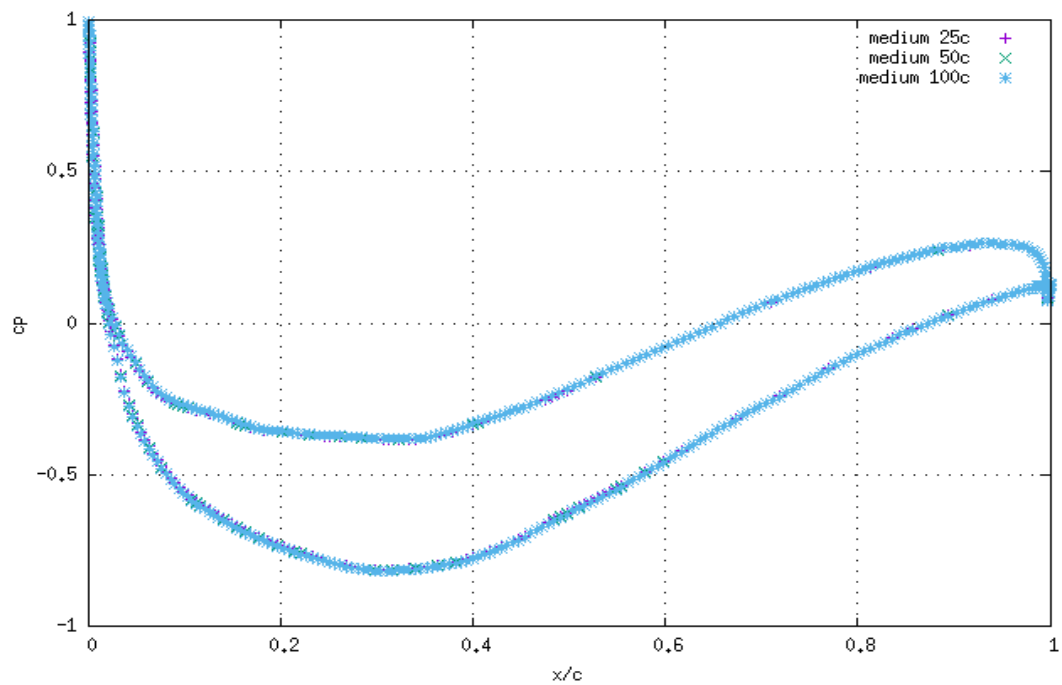
Στην προηγούμενη υπό-ενότητα μελετήσαμε την ανεξαρτησία του πλέγματος, και καταλήξαμε ότι ο αριθμός των κελιών μέσα στο υπολογιστικό πεδίο είναι 60500. Εδώ μελετάται το πόσο θα είναι το υπολογιστικό πεδίο, δηλαδή τι μέγεθος θα έχει. Μελετάμε τρεις διαφορετικές περιπτώσεις ορίων, ένα το οποίο είναι στις 25 χορδές, το άλλο στις 50 χορδές και ένα στις 100 χορδές. Όταν λέμε 25, 50 και 100 χορδές εννοούμε ότι το όριο έχει ακτίνα ίση με 25, 50 και 100 φορές αντίστοιχα την χορδή της αεροτομής. Όπως έχει λεχθεί η αεροτομή έχει μήκος χορδής 0.5 m. Έτσι παίρνουμε τα παρακάτω αποτελέσματα σε μορφή πίνακα αλλά και διαγραμματικά:

	κελιά	cl	cd	err(%)-cl	err(%)-cd
medium_25c	45500	0.3229	0.0125	1.22	1.6
medium_50c	60500	0.3256	0.0124	0.39	0.48
medium_100c	67500	0.3269	0.0123		

Στο παραπάνω πίνακα φαίνονται οι τιμές των συντελεστών άνωσης και αντίστασης σε μηδενική γωνία πρόσπτωσης και για τις τρεις περιπτώσεις μεγέθους του υπολογιστικού χωρίου.



Εικόνα 3.1.2-Διάγραμμα συντελεστών άνωσης και αντίστασης για υπολογιστικό όριο στις 25,50 και 100 χορδές

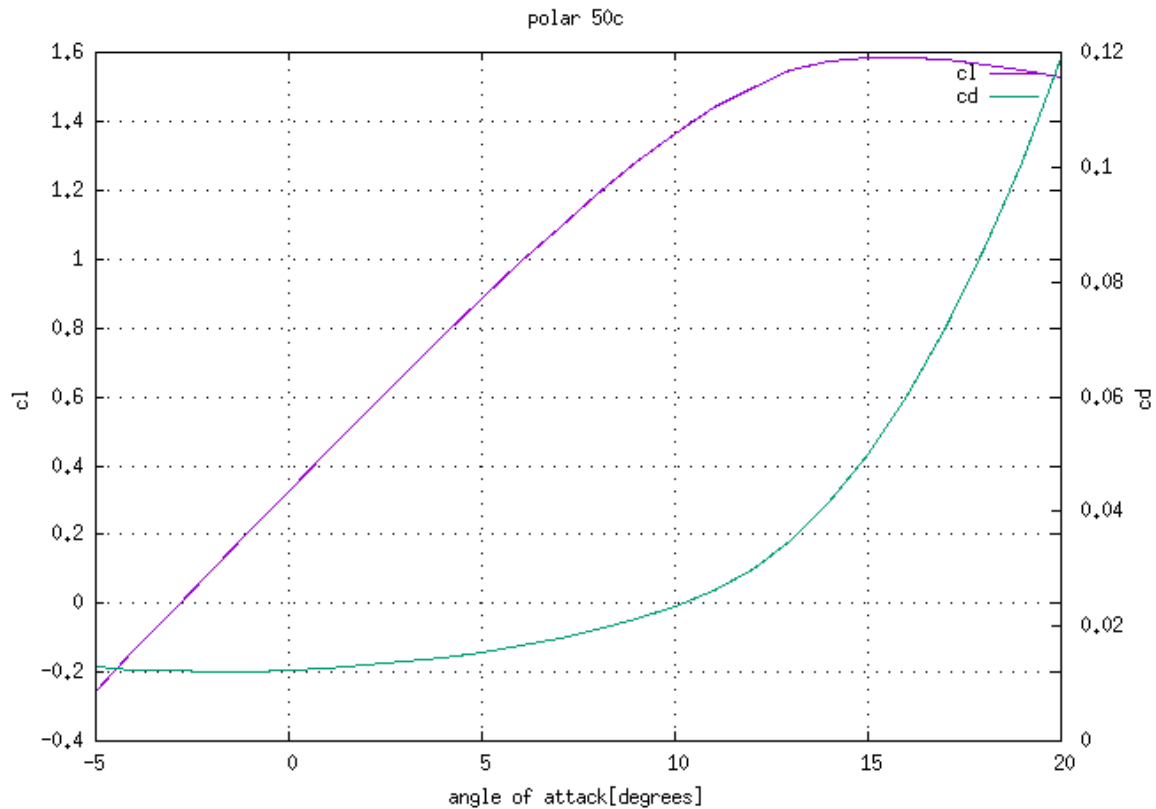


Εικόνα 3.1.3-Διάγραμμα κατανομής της πίεσης πάνω στην αεροτομή για το πλέγμα με 60500 κελιά για τρία όρια υπολογιστικού πεδίου.Ένα στις 25 χορδές(όνομα 'medium 25c'),ένα στις 50 χορδές(όνομα 'medium 50c') και το άλλο στις 100 χορδές(όνομα 'medium 100c')

Μελετώντας τα σχετικά σφάλματα των συντελεστών c_l , c_d μπορούμε να πούμε πως, αν το όριο του υπολογιστικού πεδίου από 100 χορδές γίνει 50 χορδές το σχετικό σφάλμα είναι κάτω της μονάδας. Μικραίνοντας κι άλλο το όριο σε 25 χορδές το σφάλμα ξεπερνά τη μονάδα. Έτσι ικανοποιητικό μέγεθος για το υπολογιστικό πεδίο είναι στις 50 χορδές. Επιπρόσθετα παρατηρώντας την εικόνα 3.1.3 η κατανομή της πίεσης για τα τρία όρια δεν μεταβάλλεται.

3.1.2.3 Δημιουργία πολικού διαγράμματος για $Re=1.5 \cdot 10^6$

Αφού καταλήξαμε στο μέγεθος του ορίου του υπολογιστικού πεδίου και τον αριθμό των κελιών που θα έχει το πεδίο αυτό επόμενο βήμα είναι να πάρουμε το πλέγμα `medium_50c`, το οποίο είναι το πλέγμα με 60500 κόμβους και όριο ακτίνας ίσης με 50 χορδές και περιστρέφοντας την αεροτομή σε διάφορες γωνίες πρόσπτωσης να υπολογίσουμε τους συντελεστές άνωσης και αντίστασης (c_l και c_d αντίστοιχα) οι οποίοι θα δώσουν το πολικό διάγραμμα για $Re=1.5 \cdot 10^6$. Το εύρος τιμών στο οποίο θα περιστραφεί η αεροτομή είναι από -5 μοίρες έως 20 μοίρες.



Εικόνα 3.1.4-Πολικό διάγραμμα των συντελεστών άνωσης(όνομα 'cl') και αντίστασης(όνομα 'cd') για την περίπτωση που η αεροτομή είναι μέσα στο όριο των 50 χορδών.

ΠΑΡΑΤΗΡΗΣΕΙΣ

Παρατηρώντας την εικόνα 3.1.4 μπορούμε να δούμε ότι ο συντελεστής άνωσης c_l αυξανόμενης της γωνίας πρόσπτωσης αυξάνεται γραμμικά μέχρι την γωνία που αντιστοιχεί περίπου στις 12 μοίρες και πέραν αυτής συνεχίζει να αυξάνει αλλά πλέον μη γραμμικά, μέχρι την γωνία 15 μοιρών στην οποία και παρουσιάζεται μέγιστος συντελεστής c_l και σε μεγαλύτερες απο αυτή τη γωνία μοίρες ο c_l αρχίζει και μειώνεται.

Όμοια για τον συντελεστή αντίστασης c_d μπορούμε να πούμε πως μέχρι περίπου τις 2 μοίρες αυξάνεται με μικρό ρυθμό και έπειτα με μεγαλύτερο ρυθμό, πράγμα αναμενόμενο καθώς η ροή μεταβαίνει από στρωτή σε τυρβώδη.

3.1.3 Συμπεράσματα

Ο σκοπός της παρούσας ενότητας ήταν ο υπολογισμός των αεροδυναμικών μεγεθών γύρω από την αεροτομή όταν αυτή είναι

εκτεθειμένη σε ελεύθερο ρεύμα αέρα. Το μέγεθος του ορίου καθορίστηκε στις 50 χορδές. Ο υπολογισμός του ορίου και του αριθμού των κελιών μέσα σε αυτό επιτεύχθηκε με τη σύγκριση των συντελεστών c_l, c_d καθώς και της κατανομής της πίεσης γύρω από την αεροτομή. Έτσι επιλέχθηκε το πλέγμα με το όνομα `medium_50c` και είναι το πλέγμα με 60500 κελιά και όριο ακτίνας ίσης με 50 χορδές. Περιστρέφοντας την αεροτομή σε εύρος γωνιών πρόσπτωσης από -5 έως 20 μοίρες προέκυψε το πολικό διάγραμμα για τη περίπτωση αυτή. Από το διάγραμμα αυτό προκύπτουν οι ακόλουθες παρατηρήσεις:

1. Η καμπύλη του συντελεστή c_l αυξάνεται με τη γωνία πρόσπτωσης μέχρι την γωνία που ο συντελεστής c_l παίρνει την μέγιστη τιμή του και αμέσως μετά αρχίζει να μειώνεται.

2. Η μέγιστη τιμή του συντελεστή c_l εμφανίζεται στις 15 μοίρες γωνίας πρόσπτωσης και η τιμή του είναι ίση με $c_l(15 \text{ μοίρες}) = 1.5877$

3.2 Δημιουργία πλέγματος για την αεροτομή μέσα στη σήραγγα

3.2.1 Περιγραφή

Σκοπός της παρούσας ενότητας είναι η μελέτη της επίδρασης των τοιχωμάτων της αεροσήραγγας πάνω στα αποτελέσματα που παίρνουμε από τις μετρήσεις στην αεροτομή στις δύο διαστάσεις. Γι αυτό τον σκοπό θα υπολογιστούν τα απαραίτητα αεροδυναμικά μεγέθη, δηλαδή ο συντελεστής άνωσης c_l , αντίστασης c_d καθώς και η κατανομή της πίεσης γύρω από την αεροτομή όταν αυτή είναι τοποθετημένη μέσα στην αεροσήραγγα. Η αεροσήραγγα που χρησιμοποιείται είναι η αεροσήραγγα που βρίσκεται στο τομέα Ρευστών του ΕΜΠ. Η αρχή των αξόνων όπως και στην περίπτωση που δημιουργήσαμε το πλέγμα με όριο στις 50 χορδές είναι η ακμή πρόσπτωσης της αεροτομής. Οι διαστάσεις που χρησιμοποιήθηκαν για την κατασκευή της αεροσήραγγας υπολογιστικά δίνονται από τις πραγματικές διαστάσεις της διαιρούμενες με το μήκος χορδής της αεροτομής που στην περίπτωση της NACA 63418 είναι 0.5m. Επομένως αναφερόμαστε σε αδιάστατα μεγέθη. Θα πρέπει στην εγχειρησή μας να δημιουργήσουμε υπολογιστικά την αεροσήραγγα και κατόπιν να

κάνουμε τους υπολογισμούς μας στην αεροτομή να ελέγξουμε το είδος και τον αριθμό των κελιών του πλέγματος, και να επιλέξουμε αυτά με το μικρότερο υπολογιστικό κόστος αλλά ταυτόχρονα να μας παρέχουν κι αξιόπιστα αποτελέσματα (δηλαδή σφάλμα μικρότερο της μονάδας). Πρέπει στη συνέχεια να ελεγχθεί ποιά τμήματα της αεροσήραγγας είναι απαραίτητα να τοποθετηθούν και να συνυπολογιστούν ώστε τα αποτελέσματα να είναι έγκυρα. Τα τμήματα που θα ελεγχθούν είναι το τμήμα που προηγείται το θαλάμου δοκιμών και είναι το τμήμα του ακροφυσίου, ο θάλαμος δοκιμών στον οποίο τοποθετείται η αεροτομή, και το τμήμα που έπεται του θαλάμου δοκιμών και είναι το τμήμα του διαχύτη. Επίσης θα πρέπει να ελεγχθεί αν η επίδραση του οριακού στρώματος πάνω στα τοιχώματα της αεροσήραγγας είναι σημαντική ή όχι στα αποτελέσματα των ποσοτήτων που υπολογίζονται στην αεροτομή.

Τέλος μόλις ελεγχθούν όλα τα παραπάνω θα δημιουργήσουμε το πολικό διάγραμμα στη περίπτωση της αεροτομής μέσα στην αεροσήραγγα σε εύρος γωνιών πρόσπτωσης από -5 έως 20 μοίρες. Το διάγραμμα αυτό θα συγκριθεί με το διάγραμμα 50c και θα προκύψουν ανάλογες παρατηρήσεις και συμπεράσματα.

3.2.1.1 Ποια είναι η καλύτερη στρατηγική;

Εδώ θα μελετήσουμε και θα αποφασίσουμε το είδος και τον αριθμό των κελιών για το πλέγμα μέσα στη σήραγγα. Τα είδη των κελιών διακρίνονται σε τριγωνικά και ορθογωνικά.

Αρχικά δημιουργούμε το πλέγμα στην αεροσήραγγα με τριγωνικά κελιά. Για να αποφανθούμε πόσα κελιά θα έχει το πλέγμα μεταβάλλουμε τον αριθμό των κελιών σε τρεις περιοχές του πλέγματος. Οι τρεις αυτές περιοχές είναι οι ακόλουθες: η περιοχή ανάντι της αεροτομής από την είσοδο της σήραγγας μέχρι την ακμή πρόσπτωσης της αεροτομής, η περιοχή κατάντι της αεροτομής από την ακμή εκφυγής της αεροτομής μέχρι την έξοδο της σήραγγας και η περιοχή πάνω και κάτω της αεροτομής από την ακμή πρόσπτωσης μέχρι την ακμή εκφυγής.

1^η περίπτωση

Αρχικά δημιουργείται ένα πλέγμα με 51755 τριγωνικά κελιά.

Ανάντι 40 κόμβοι στις γραμμές της ανάντι περιοχής

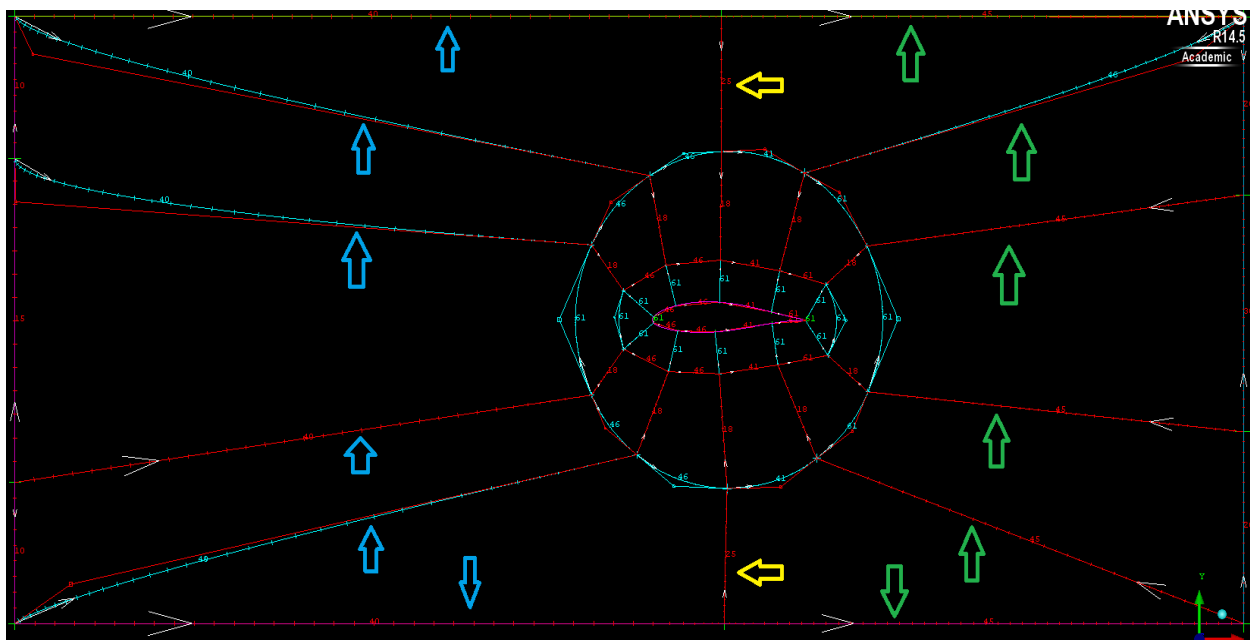
Πάνω κάτω 25 κόμβοι στις γραμμές της πάνω-κάτω περιοχής

Κατάντι 45 κόμβοι στις γραμμές της κατάντι περιοχής

Τα αεροδυναμικά μεγέθη αυτής της περίπτωσης είναι

cl	cd
0.33856	0.012667

Όταν λέμε κόμβους στις γραμμές αναφερόμαστε στις γραμμές (edges) του ICEM CFD πάνω στις οποίες γράφουμε τον αριθμό των διαμερίσεων και έτσι προκύπτει ο συνολικός αριθμός των κελιών .π.χ. σε έναν χώρο που αποτελείται από τέσσερις γραμμές, βάζουμε σε κάθε μια γραμμή έναν αριθμό διαμερίσεων και έτσι θα προκύψει η διακριτοποίηση του χώρου. Έτσι λοιπόν όταν σε κάθε περιοχή που βλέπουμε ο αριθμός αναφέρεται στους κόμβους που βάζουμε στις γραμμές ώστε να προκύψει το πλέγμα. Τέλος να πούμε πως αυτό το πλέγμα θα είναι το πλέγμα αναφοράς. Αυτό σημαίνει πως κάθε πλέγμα που δημιουργείται με μεταβολή των κόμβων των γραμμών της κάθε περιοχής θα συγκρίνεται με το πλέγμα αναφοράς και με βάση αυτό θα καταλήξουμε τελικά ποιος θα είναι ο απαραίτητος αριθμός των κελιών σε κάθε περιοχή του πλέγματος. Για να γίνουν κατανοητά τα παραπάνω θα γίνει εδώ μια σχηματική αναπαράσταση των γραμμών της κάθε περιοχής του πλέγματος.



Εικόνα 3.2.1.1- Δείχνει το τρόπο κατασκευής του πλέγματος στις τρεις περιοχές, δηλαδή την ανάντι,την πάνω-κάτω περιοχή και την κατάντι περιοχή. Οι αντίστοιχες γραμμές της κάθε περιοχής στις οποίες τοποθετούμε τους κόμβους δείχνονται με μπλε, κίτρινα και πράσινα βέλη αντίστοιχα.

Η παραπάνω εικόνα είναι μια σχηματική αναπαράσταση του πως φτιάχνονται τα πλέγματα στο ANSYS/ICEM CFD. Συγκεκριμένα όπως αναφέρθηκε παραπάνω για να δημιουργηθεί το πλέγμα βάζουμε τον αριθμό των διαμερίσεων που θέλουμε πάνω στις γραμμές του πλέγματος. Οι λεγόμενες γραμμές είναι αυτές που δείχνονται με τα βέλη.Οι γραμμές της ανάντι περιοχής είναι αυτές που δείχνονται με τα μπλε βέλη, ενώ οι γραμμές της πάνω-κάτω περιοχής δείχνονται με τα κίτρινα βέλη, και τέλος οι γραμμές της κατάντι περιοχής του πλέγματος δείχνονται με πράσινες γραμμές.Επιπρόσθετα λέγοντας την φράση ‘40 κόμβοι στις γραμμές της ανάντι περιοχής’, εννοούμε ότι τοποθετούμε στις γραμμές που δείχνονται με τα μπλε βέλη 40 κόμβους. Αντιστοίχως για τη πάνω-κάτω περιοχή και την κατάντι. Έτσι λοιπόν ελέγχουμε πιο κάτω περιπτώσεις με διαφορετικούς συνδυασμούς κόμβων στις γραμμές των τριών περιοχών.

2^η περίπτωση

Δημιουργούμε το πλέγμα με 63232 τριγωνικά κελιά όπου διπλασιάζουμε τους κόμβους των γραμμών της ανάντι και πάνω-κάτω περιοχής, δηλαδή

διπλασιάζουμε τον αριθμό των κελιών στις γραμμές που δείχνονται με μπλε και κίτρινα βέλη. Έτσι:

Ανάντι 80

Πάνω κάτω 50

Κατάντι 45

Τα αποτελέσματα είναι τα εξής

	cl	cd	err(%) - cl	Err-(%) - cd
ανάντι	0.338543	0.0126631	0	0

Το σχετικό σφάλμα προκύπτει από τους τύπους

$$err_{cl} = \frac{cl_{ref} - cl}{cl_{ref}} \cdot 100 \text{ και}$$

$$err_{cd} = \frac{cd_{ref} - cd}{cd_{ref}} \cdot 100$$

Όπου στις ποσότητες με δείκτη ref βάζουμε τις αντίστοιχες της περίπτωσης 1. Το σφάλμα προκύπτει μηδενικό τόσο για το cl όσο και για το cd. Επομένως η αύξηση των κελιών αυτής της περιοχής δεν επηρεάζει τα αποτελέσματα

3^η περίπτωση

Εδώ θέλουμε να ελέγξουμε την επίδραση της πάνω-κάτω περιοχής και της κατάντι στα αποτελέσματα. Για τον λόγο αυτό δημιουργούμε το πλέγμα με 82577 τριγωνικά κελιά, όπου προέκυψαν με μεταβολή των κόμβων των γραμμών την πάνω-κάτω περιοχής και της κατάντι (στο ανωτέρω σχήμα εννοούμε τις γραμμές που δείχνονται με τα κίτρινα και τα πράσινα βέλη). Έτσι:

Ανάντι 40

Πάνω κάτω 100

Κατάντι 100

Τα αποτελέσματα είναι τα εξής

	cl	cd	err(%) -cl	err(%) -cd
πάνω-κάτω,κατάντι	0.338527	0.012663149	0	0

4^η περίπτωση

Εδώ ελέγχουμε την επίδραση της πάνω-κάτω περιοχής στα αποτελέσματα. Γι αυτό τον λόγο πυκνώνουμε την περιοχή πάνω-κάτω της αεροτομής, δηλαδή τη περιοχή με τις γραμμές που δείχνονται με τα κίτρινα βέλη. Το πλέγμα έχει 56971 τριγωνικά κελιά.

Ανάντι 40

Πάνω κάτω 100

Κατάντι 45

Τα αποτελέσματα είναι τα εξής

	cl	cd	err(%) -cl	err(%) -cd
Πάνω-κάτω	0.338546	0.01267	0	0

Παρατηρώντας τα σχετικά σφάλματα των παραπάνω πλεγμάτων όπου ως αναφορά επιλέχτηκε το πλέγμα της 1^{ης} περίπτωσης είναι μικρότερα της μονάδας επομένως μπορούμε με απόλυτη ακρίβεια να πούμε πως το πλέγμα της 1^{ης} περίπτωσης είναι ικανοποιητικό. Στη συνέχεια ελέγχουμε το πλέγμα με δομή ορθογωνικών κελιών

Ορθογωνικά κελιά

Αρχικώς ως πλέγμα αναφοράς επιλέγεται αυτό που έχουμε δημιουργήσει με τα 44644 ορθογωνικά κελιά, στο οποίο ο αριθμός των κόμβων των γραμμών της κάθε περιοχής φαίνεται παρακάτω:

Ανάντι 40

Πάνω κάτω 25

Κατάντι 45

Όμοια με πριν οι αριθμοί αυτοί υποδηλώνουν τους κόμβους των γραμμών που δείχνονται με τα βέλη στην εικόνα 3.2.1.1.

cl	cd
0.339767	0.012677

Στη συνέχεια αυξάνουμε τον αριθμό των κόμβων των γραμμών της περιοχής πάνω-κάτω από την αεροτομή σε 50 και ο συνολικός αριθμός των κελιών είναι 45394 ορθογωνικά κελιά, οπότε προκύπτει για τους κόμβους των γραμμών των τριών περιοχών:

Ανάντι 40

Πάνω κάτω 50

Κατάντι 45

cl	cd	err(%) - cl	err(%) - cd
0.338586	0.0126941	0.34	0.13

Παρατηρούμε πως η μεταβολή του αριθμού των κόμβων των γραμμών της πάνω-κάτω περιοχής δεν επηρεάζει τα αποτελέσματα. Εδώ πάλι τα σχετικά σφάλματα προέκυψαν μέσω των παραπάνω τύπων με το πλέγμα αναφοράς που επιλέχθηκε παραπάνω.

Στη συνέχεια συγκρίνοντας το πλέγμα με τα τριγωνικά κελιά με αυτό με τα ορθογωνικά θα καταλήξουμε με ποιο είδος πλέγματος και με ποιο αριθμό κελιών θα συνεχίσουμε την ανάλυση μας.Επομένως έχουμε:

κελιά	Είδος κελιού	cl	cd	err(%)-cl	err(%)-cd
44644	ορθογωνικό	0.339767	0.012677	0.35	0.078
51755	τριγωνικό	0.33856	0.012667		

Το μεταξύ τους σφάλμα είναι μικρότερο της μονάδας και επιλέγουμε το πλέγμα με τα ορθογωνικά κελιά αφού έχει μικρότερο αριθμό κελιών και επιπλέον έχει το πλεονέκτημα το ότι το πλέγμα είναι δομημένο (structured) σε σχέση με το πλέγμα με τα τριγωνικά κελιά όπου είναι μη δομημένο (unstructured). Επομένως επιλέγεται το πλέγμα με τα 44644 ορθογωνικά κελιά.

3.2.2 Αποτελέσματα

3.2.2a Χρειάζεται το οριακό στρώμα πάνω στα τοιχώματα της σήραγγας;

Αρχικά ελέγχουμε τη περίπτωση ανάπτυξης οριακού στρώματος πάνω στα τοιχώματα της αεροσήραγγας. Χρησιμοποιώντας το πρόγραμμα ANSYS/ICEM CFD πυκνώνουμε το πλέγμα κοντά στα τοιχώματα της αεροσήραγγας. Τα συνολικά κελιά είναι τώρα 46764.

Έτσι για το πλέγμα με την ύπαρξη οριακού στρώματος πάνω στα τοιχώματα παίρνουμε

	cl	cd	err(%)-cl	err(%)-cd
Με οριακό στρώμα	0.3419	0.01310	0.6	3.4
Χωρίς οριακό στρώμα	0.339767	0.012677		

Το παραπάνω σφάλμα προκύπτει ως ο λόγος της απόλυτης διαφοράς των τιμών συντελεστή άνωσης (αντίστοιχα των τιμών του συντελεστή αντίστασης) του πλέγματος με οριακό στρώμα και του πλέγματος χωρίς οριακό στρώμα προς τη τιμή του συντελεστή άνωσης(αντίστοιχα της τιμής του συντελεστή αντίστασης) του πλέγματος χωρίς οριακό στρώμα. Παρατηρούμε πως το σφάλμα του συντελεστή άνωσης είναι μικρότερο της

μονάδας. Το σφάλμα του συντελεστή αντίστασης c_d είναι στο 3.4%. Η απόλυτη διαφορά τους είναι πολύ μικρή, έτσι η τιμή αυτή οφείλεται στο ότι διαιρείται με μια πολύ μικρή τιμή (τιμή του $c_d = 0.013$). Η ύπαρξη του οριακού στρώματος δεν επηρεάζει τα αποτελέσματα.

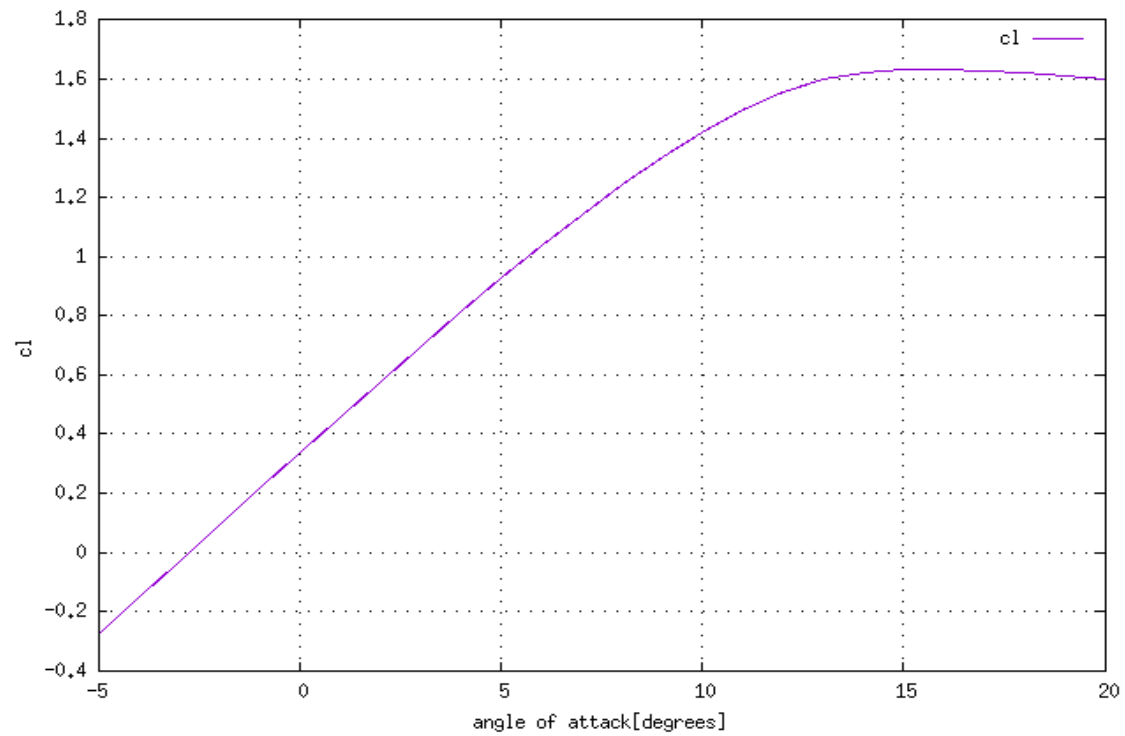
Σε αυτό το σημείο παίρνουμε το πλέγμα με τα 44644 κελιά και θα κάνουμε μια πρώτη εκτίμηση πολικού διαγράμματος. Έτσι περιστρέφουμε την αεροτομή σε εύρος γωνιών από -5 έως 20 μοίρες. Προκύπτει σε αυτή την περίπτωση μέγιστη τιμή του συντελεστή c_l στις 16 μοίρες γωνία πρόσπτωσης ίση με $c_{l_{\max}} = 1.634$. Επομένο βήμα είναι να εξετάσουμε την επίδραση του συγκλίνοντος και αποκλίνοντος τμήματος της σήραγγας. Το παραπάνω πλέγμα ως προς την δομή των κελιών έχουμε για τις τρεις περιοχές του πλέγματος της σήραγγας:

Ανάντι 40

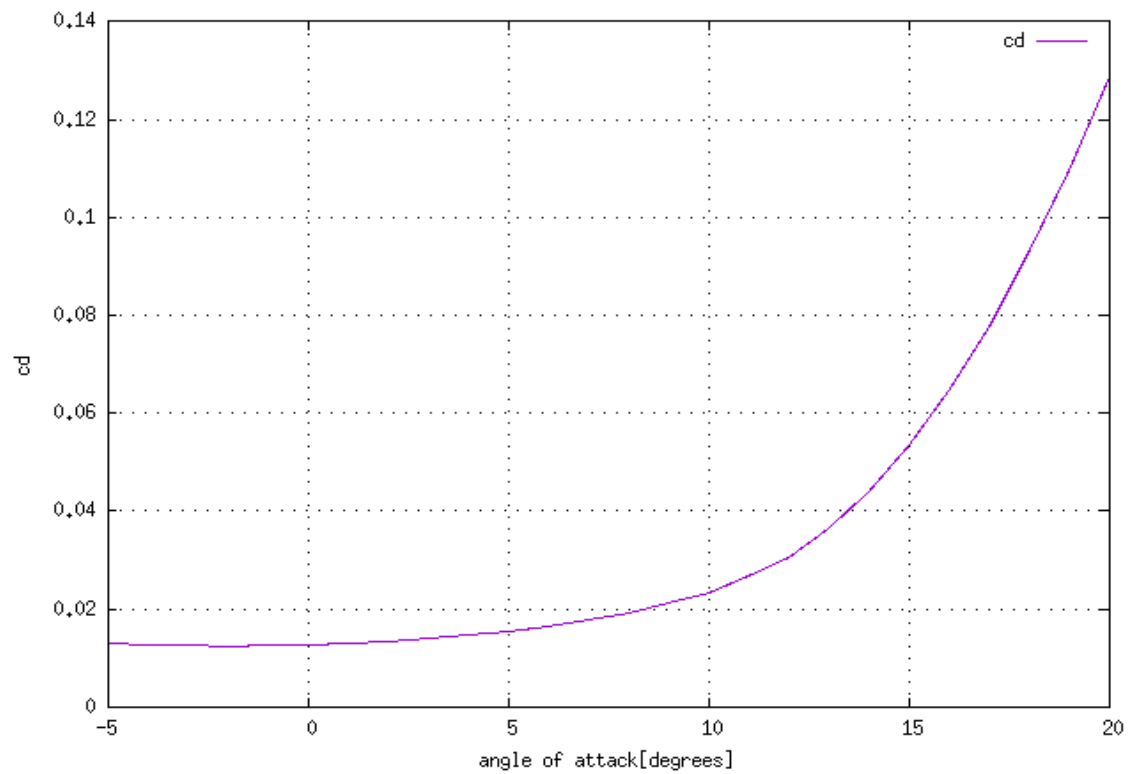
Πάνω-κάτω 25

Κατάντι 45

Που σημαίνει πως σύμφωνα με το σχήμα της εικόνας 3.2.1.1 στις γραμμές της ανάντι περιοχής που δείχνονται με τα μπλε βέλη τοποθετήθηκαν 40 κόμβοι, ενώ στις γραμμές της πάνω-κάτω περιοχής που δείχνονται με κίτρινα βέλη τοποθετήθηκαν 25 κόμβοι και τέλος στις γραμμές της κατάντι περιοχής που δείχνονται με πράσινα βέλη τοποθετήθηκαν 45 κόμβοι.



Εικόνα 3.2.2α1-Διάγραμμα του συντελεστή άνωσης συναρτήσει της γωνίας πρόσπτωσης με το πλέγμα μόνο μέσα στη σήραγγα και χωρίς την ύπαρξη οριακού στρώματος.



Εικόνα 3.2.2α2-Διάγραμμα του συντελεστή αντίστασης συναρτήσει της γωνίας πρόσπτωσης με το πλέγμα μόνο μέσα στη σήραγγα και χωρίς την ύπαρξη οριακού στρώματος.

3.2.2b Χρειάζεται η ύπαρξη του αποκλίνοντος τμήματος(diffuser);

Εδώ θα ελέγξουμε κατά πόσο η ύπαρξη του αποκλίνοντος τμήματος επηρεάζει ή όχι τα αποτελέσματα. Υπολογίζουμε τους αεροδυναμικούς συντελεστές και την κατανομή της πίεσης σε τρεις γωνίες πρόσπτωσης. Έτσι παίρνουμε

Αποκλίνον τμήμα	cl	cd	err(%) -cl	err(%) -cd
0 μοίρες	0.3393	0.0121	0	4
15 μοίρες	1.6529	0.050	1	6
16 μοίρες	1.6575	0.061	1	5

Τα σχετικά σφάλματα των συντελεστών cl, cd προκύπτουν με εφαρμογή των τύπων

$$err_{cl} = \frac{cl_{ref} - cl}{cl_{ref}} \cdot 100 \text{ και}$$

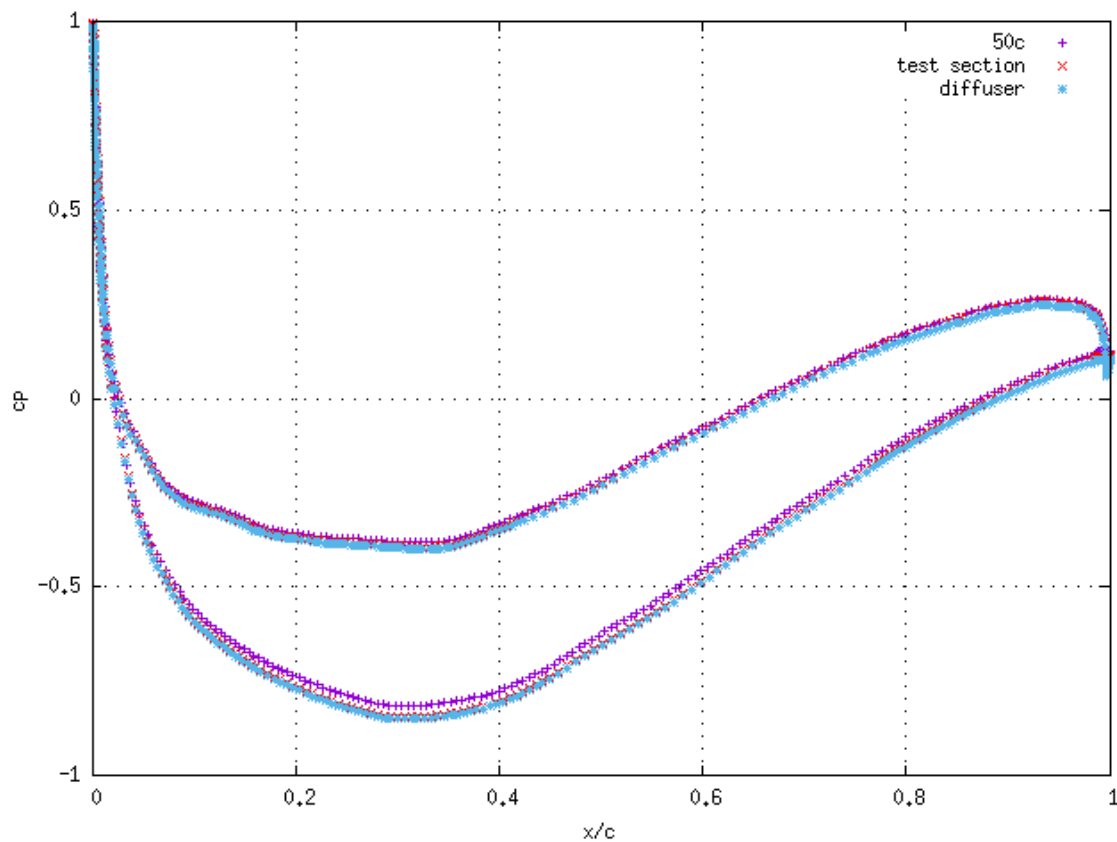
$$err_{cd} = \frac{cd_{ref} - cd}{cd_{ref}} \cdot 100$$

Όπου ως αναφορά επιλέχθηκε το πλέγμα της σήραγγας(που έχει 60500 κελιά).

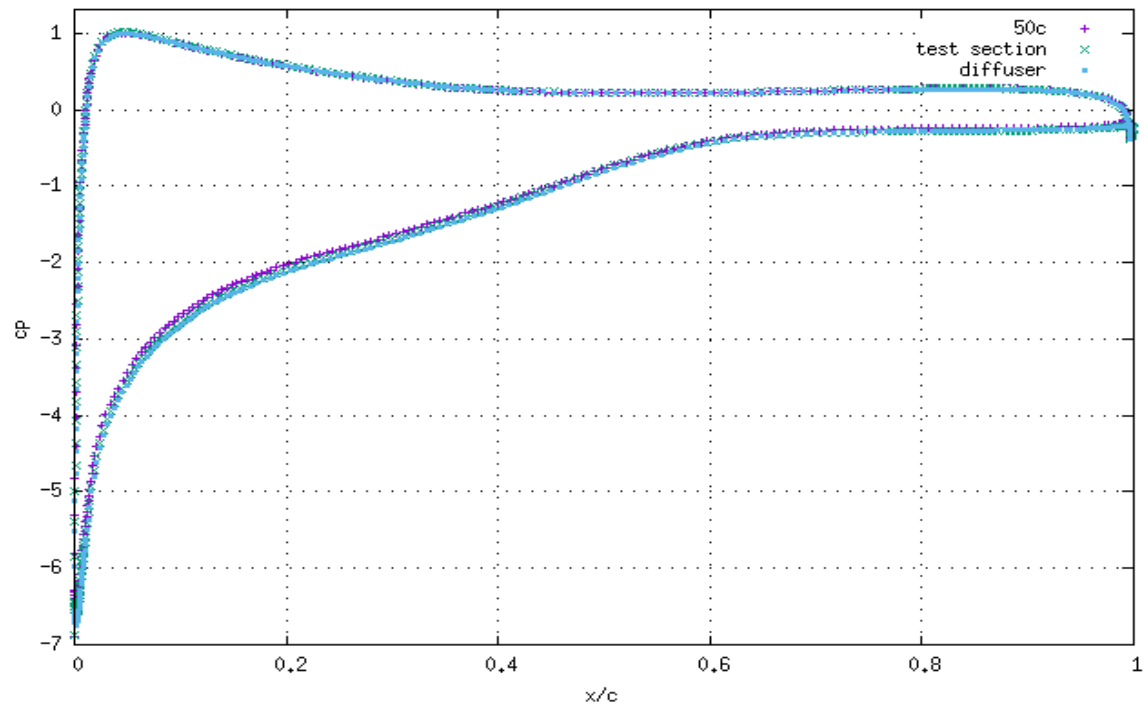
Παρατηρούμε πως το σφάλμα του συντελεστή άνωσης είναι μηδενικό για τη περίπτωση της μηδενικής γωνίας πρόσπτωσης, ενώ του συντελεστή cd έχει τιμή στο 4%. Επίσης το σφάλμα για το συντελεστή άνωσης είναι 1% και για τις 15 και τις 16 μοίρες ενώ το σφάλμα του συντελεστή αντίστασης είναι 6 και 5% αντίστοιχα. Τα σχετικά σφάλματα του cd προκύπτουν μεγάλα διότι παρόλο που οι απόλυτες διαφορές είναι πολύ μικρές διαιρούνται με πολύ μικρότερες ποσότητες, κι γι αυτό προκύπτουν μεγάλες τιμές.

Θα μπορούσαμε να βγάλουμε συμπέρασμα με τα αποτελέσματα που προέκυψαν με την αεροτομή στη μηδενική γωνία πρόσπτωσης, αλλά για να έχουμε πιο σαφή εικόνα των αποτελεσμάτων χρησιμοποιήσαμε και ακόμη δύο γωνίες πρόσπτωσης. Στις 15 μοίρες όπως είδαμε παρουσιάζει μέγιστο συντελεστή c_l η αεροτομή όταν βρίσκεται εκτεθειμένη σε ελεύθερο ρεύμα αέρα και στις 16 μοίρες έχουμε μέγιστο συντελεστή άνωσης c_l για την αεροτομή όταν είναι τοποθετημένη μέσα στο θάλαμο δοκιμών της αεροσήραγγας

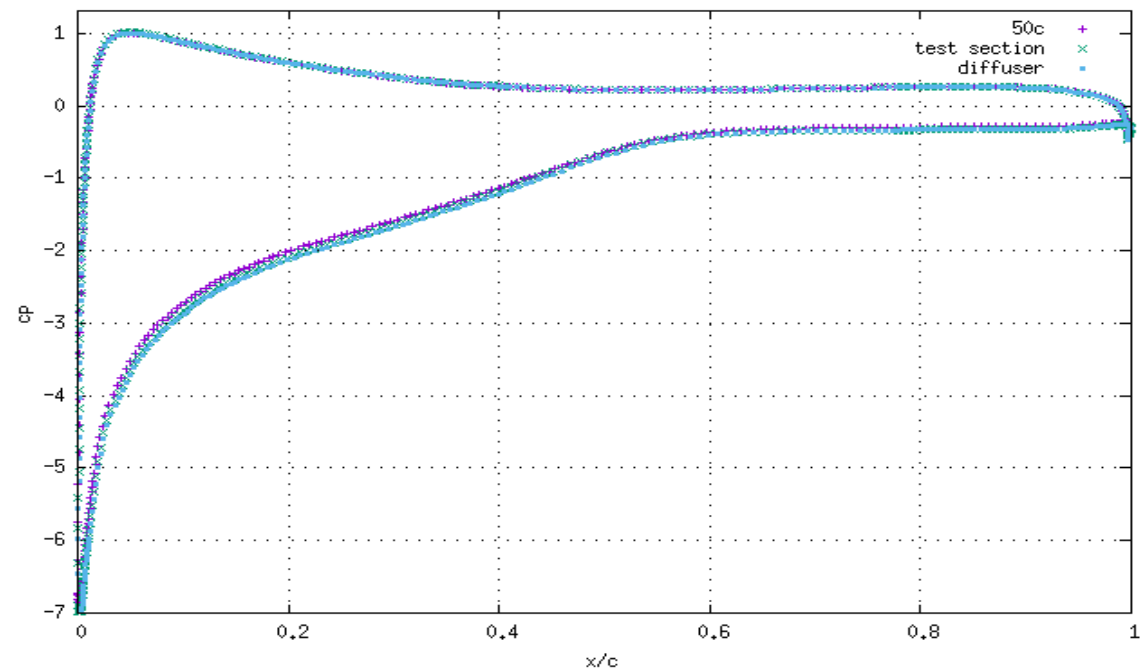
Στις εικόνες 3.2.3 ,3.2.4 και 3.2.5 δίνονται οι κατανομές της πίεσης στις 0,15 και 16 μοίρες γωνία πρόσπτωσης



Εικόνα 3.2.3-Διάγραμμα κατανομής της πίεσης σε μηδενική γωνία πρόσπτωσης για τη περίπτωση όπου η αεροτομή είναι τοποθετημένη μέσα στο θάλαμο δοκιμών (όνομα 'test section'), είναι τοποθετημένη μέσα στο θάλαμο δοκιμών αλλά υπάρχει και το αποκλίνον τμήμα (όνομα 'diffuser'), και είναι εκτεθειμένη σε ελεύθερο ρεύμα αέρα (όνομα '50c').



Εικόνα 3.2.4- Διάγραμμα κατανομής της πίεσης στις 15 μοίρες γωνία πρόσπτωσης για τη περίπτωση όπου η αεροτομή είναι τοποθετημένη μέσα στο θάλαμο δοκιμών (όνομα 'test section'), είναι τοποθετημένη μέσα στο θάλαμο δοκιμών αλλά υπάρχει και το αποκλίνον τμήμα (όνομα 'diffuser'), και είναι εκτεθειμένη σε ελεύθερο ρεύμα αέρα (όνομα '50c').



Εικόνα 3.2.5- Διάγραμμα κατανομής της πίεσης στις 16 μοίρες γωνία πρόσπτωσης για τη περίπτωση όπου η αεροτομή είναι τοποθετημένη μέσα στο θάλαμο δοκιμών (όνομα 'test section'), είναι τοποθετημένη μέσα στο θάλαμο δοκιμών αλλά υπάρχει και το αποκλίνον τμήμα (όνομα 'diffuser'), και είναι εκτεθειμένη σε ελεύθερο ρεύμα αέρα (όνομα '50c').

Παρατηρούμε στα παραπάνω διαγράμματα πως η κατανομή της πίεσης πάνω στην αεροτομή είναι ανεξάρτητη από την ύπαρξη του αποκλίνοντος τμήματος της σήραγγας.

Και επιπλέον παρατηρώντας τα σχετικά σφάλματα των συντελεστών άνωσης c_l και αντίστασης c_d μπορούμε να πούμε πως η παρουσία του αποκλίνοντος τμήματος ως κομμάτι της αεροσήραγγας δεν μεταβάλλει τα αποτελέσματα και επομένως δεν χρειάζεται να αποτελέσει τμήμα της σήραγγας.

3.2.2c Χρειάζεται η ύπαρξη του συγκλίνοντος τμήματος;

Επόμενο βήμα είναι να εξετάσουμε εν παρουσία του συγκλίνοντος τμήματος γνωστού και ως ακροφυσίου ως κομμάτι της αεροσήραγγας εάν τα αποτελέσματα των μεγεθών μεταβάλλονται, δηλαδή εάν είναι σημαντικά διαφορετικά από αυτά όταν η αεροτομή είναι τοποθετημένη μόνο στον θάλαμο δοκιμών.

Σχεδιάζουμε τη βοήθεια του ICEM CFD το συγκλίνον τμήμα της αεροσήραγγας μαζί με τον θάλαμο δοκιμών. Και τρέχοντας το κώδικα Marflow πήραμε τα αποτελέσματα κατανομής πίεσης πάνω στην αεροτομή, και τις τιμές των συντελεστών άνωσης και αντίστασης, c_l και c_d αντίστοιχα.

Για την αεροτομή τοποθετημένη στη μηδενική γωνία πρόσπτωσης πήραμε

Συγκλίνον τμήμα	c_l	c_d	err(%)- c_l	err(%)- c_d
0 μοίρες	0.3425	0.012	1	5

Παρατηρούμε πως το σφάλμα του c_l είναι στο 1%, ενώ του c_d στο 5 %

Κάνουμε υπολογισμούς για ακόμη δύο γωνίες πρόσπτωσης, τις 15 και τις 16 όπως κάναμε και με το αποκλίνον τμήμα. Τα αποτελέσματα παρουσιάζονται παρακάτω:

Συγκλίνον τμήμα	cl	cd	err(%)-cl	err(%)-cd
15 μοίρες	1.615	0.0546	1	2

Το σφάλμα στις 15 μοίρες για το cl είναι 1% ενώ για το cd 2%

Συγκλίνον τμήμα	cl	cd	err(%)-cl	err(%)-cd
16 μοίρες	1.6135	0.066	1	2

Για γωνία πρόσπτωσης 16 μοίρες το σφάλμα για το cl είναι επίσης 1% και για το cd 2%

Τα παραπάνω σφάλματα των συντελεστων προκύπτουν από τους τύπους

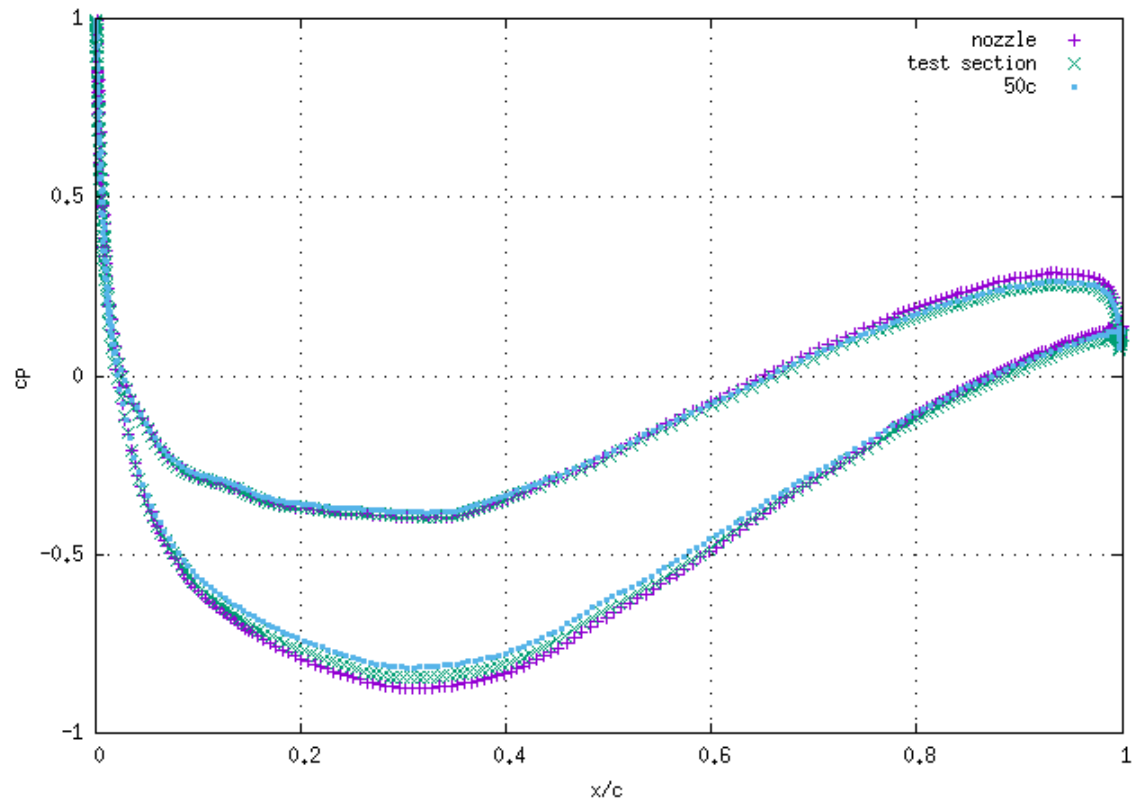
$$err_{cl} = \frac{cl - cl_{ref}}{cl_{ref}} 100\% \quad , \quad err_{cd} = \frac{cd - cd_{ref}}{cd_{ref}} 100\%$$

όπου ο δείκτης ref αναφέρεται στις παρακάτω τιμές

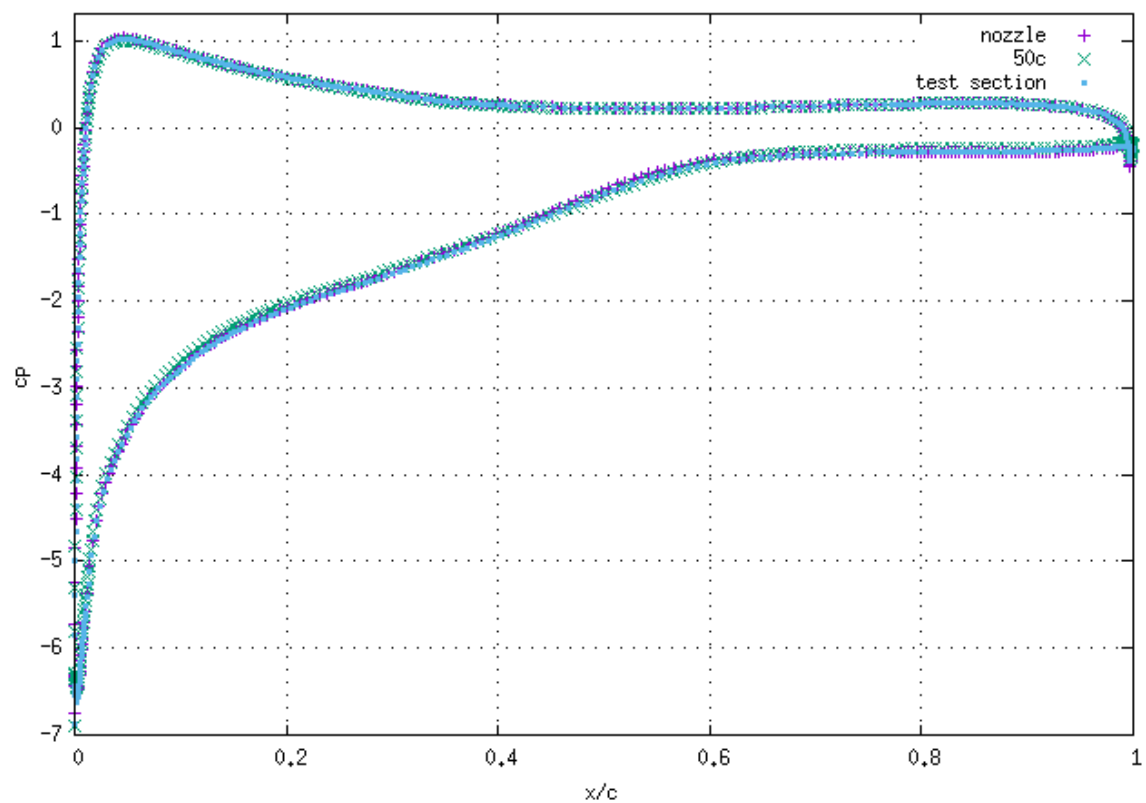
Πλέγμα σήραγγας	cl	cd
0 μοίρες	0.3385	0.01269
15 μοίρες	1.6321	0.0534
16 μοίρες	1.6341	0.0646

που αφορούν το πλέγμα μέσα στη σήραγγα με τα 44644 κελιά.

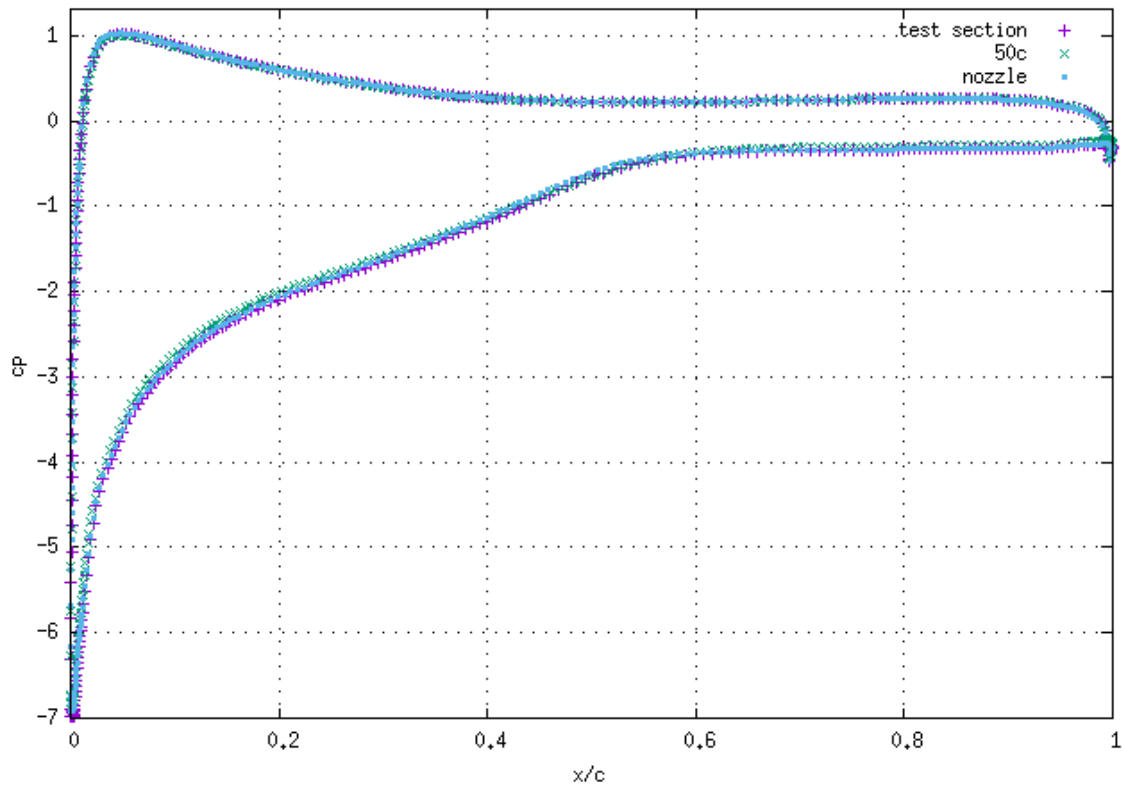
Επίσης τα διαγράμματα κατανομής της πίεσης για τις 0, 15 και 16 μοίρες αντίστοιχα φαίνονται στις εικόνες 3.2.6 ,3.27 και 3.2.8.



Εικόνα 3.2.6-Διάγραμμα κατανομής της πίεσης σε μηδενική γωνία πρόσπτωσης στην αεροτομή όταν είναι εκτεθειμένη σε ελεύθερο ρεύμα αέρα(όνομα '50c'), όταν βρίσκεται μέσα στο θάλαμο δοκιμών(όνομα 'test section') και όταν βρίσκεται μέσα στο θάλαμο δοκιμών με την ύπαρξη του συγκλίνοντος τμήματος (όνομα 'nozzle').



Εικόνα 3.2.7- Διάγραμμα κατανομής της πίεσης στις 15 μοίρες γωνία πρόσπτωσης στην αεροτομή όταν είναι εκτεθειμένη σε ελεύθερο ρεύμα αέρα(όνομα '50c'), όταν βρίσκεται μέσα στο θάλαμο δοκιμών (όνομα 'test section') και όταν βρίσκεται μέσα στο θάλαμο δοκιμών με την ύπαρξη του συγκλίνοντος τμήματος (όνομα 'nozzle').

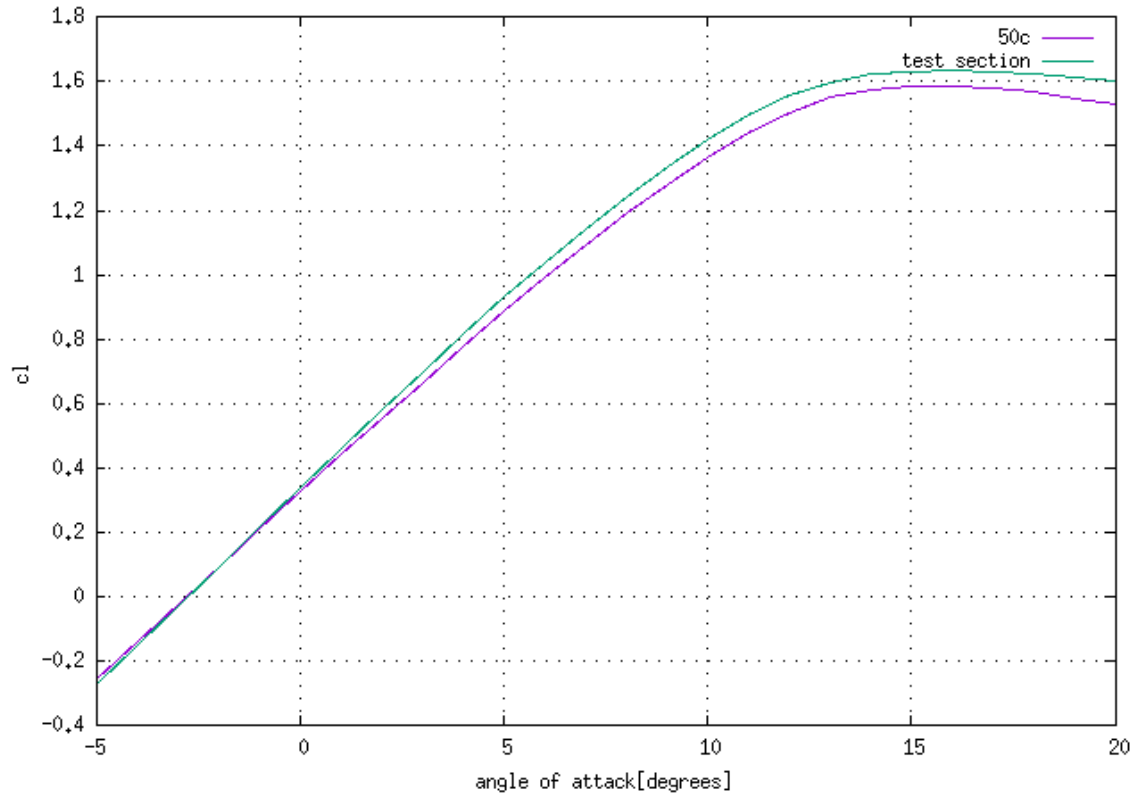


Εικόνα 3.2.8- Διάγραμμα κατανομής της πίεσης στις 16 μοίρες γωνία πρόσπτωσης στην αεροτομή όταν είναι εκτεθειμένη σε ελεύθερο ρεύμα αέρα (όνομα '50c'), όταν βρίσκεται μέσα στο θάλαμο δοκιμών (όνομα 'test section') και όταν βρίσκεται μέσα στο θάλαμο δοκιμών με την ύπαρξη του συγκλίνοντος τμήματος (όνομα 'nozzle').

Παρατηρώντας τη κατανομή της πίεσης σε όλες τις γωνίες πρόσπτωσης τα διαγράμματα ταυτίζονται μεταξύ τους. Επομένως δεν είναι απαραίτητη η ύπαρξη του συγκλίνοντος τμήματος.

Ανακεφαλαιώνοντας το συγκλίνον και αποκλίνον τμήμα δεν είναι απαραίτητα να υπάρχουν ως τμήματα της σήραγγας. Επίσης η ύπαρξη του οριακού στρώματος δεν επηρεάζει τα αποτελέσματα.

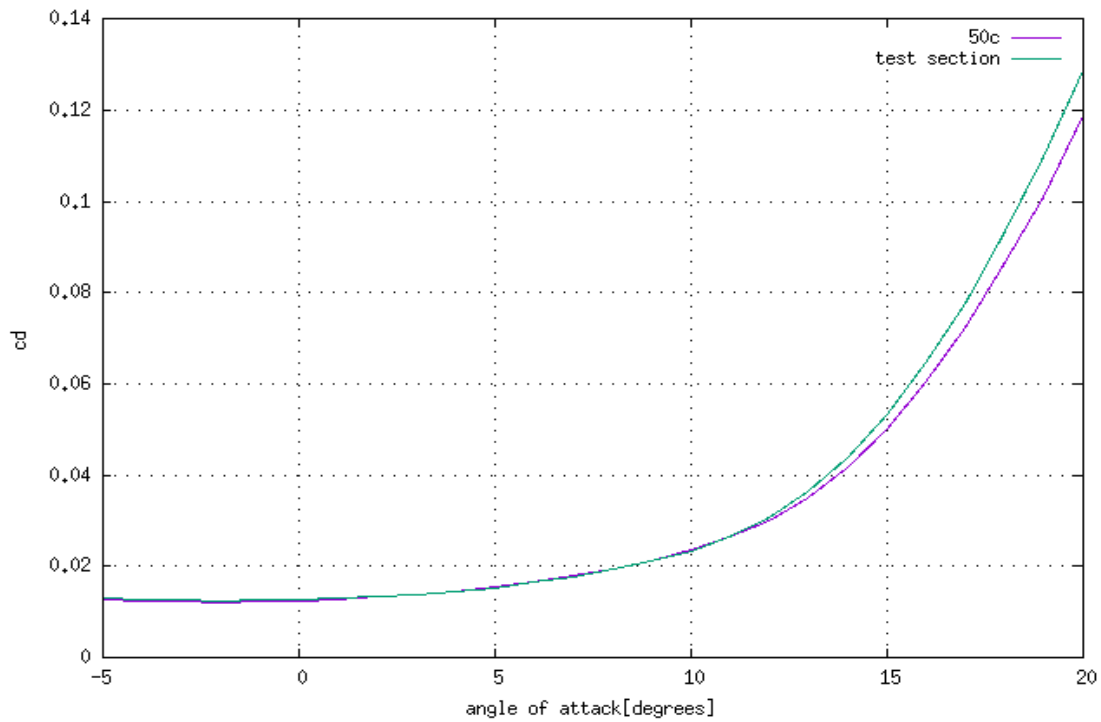
3.2.2d Δημιουργία πολικού διαγράμματος για $Re=1.5 \cdot 10^6$



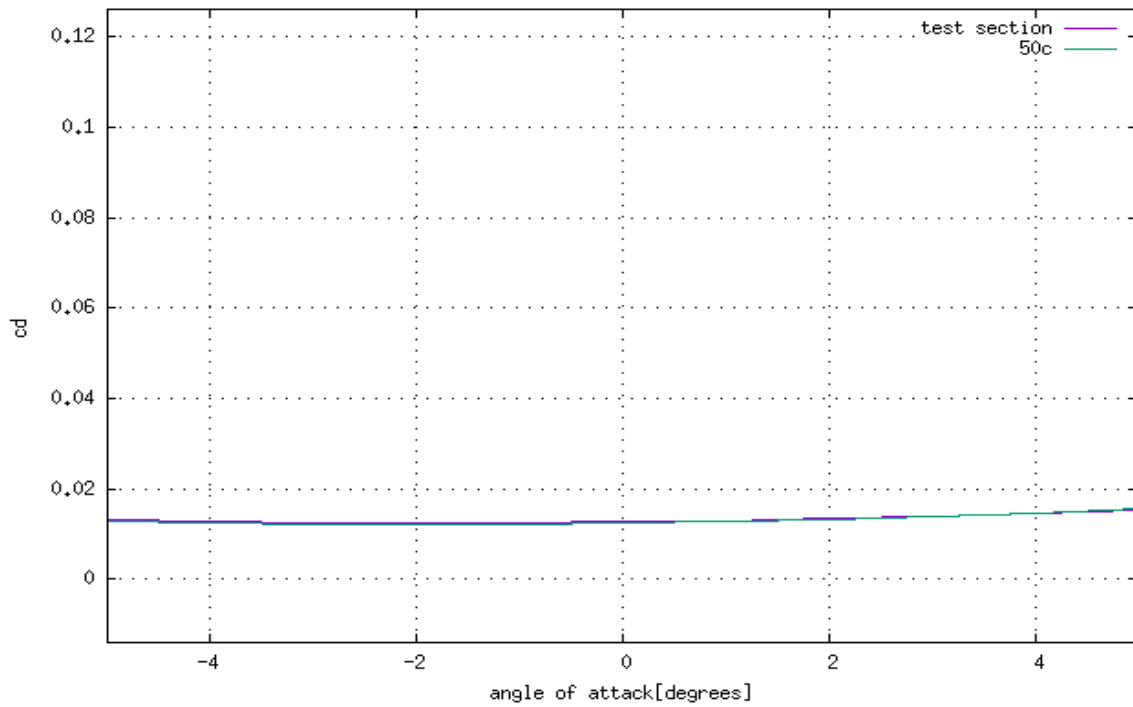
Εικόνα 3.2.9-Διάγραμμα του συντελεστή c_l συναρτήσει της γωνίας πρόσπτωσης για την περίπτωση του πλέγματος μέσα στη σήραγγα (όνομα 'test section') και για τη περίπτωση όπου η αεροτομή είναι εκτεθειμένη σε ελεύθερο ρεύμα αέρα (όνομα '50c').

Στο διάγραμμα c_l -α (εικόνα 3.2.9) έχουμε δύο καμπύλες. Με μωβ συμβολίζεται η καμπύλη c_l -α που αφορά την αεροτομή εκτεθειμένη σε ελεύθερο ρεύμα αέρα με όριο στις 50 χορδές και με πράσινο χρώμα συμβολίζεται η καμπύλη c_l -α της αεροτομής μέσα στο θάλαμο δοκιμών.

Παρατηρούμε πως οι δύο καμπύλες ταυτίζονται περίπου μέχρι τις 2 μοίρες και καθώς αυξάνεται η γωνία πρόσπτωσης αυτές οι καμπύλες απομακρύνονται μεταξύ τους. Επίσης όσον αφορά τη καμπύλη του test section παρατηρούμε πως έχουμε αύξηση του c_l με αύξηση της γωνίας πρόσπτωσης μέχρι την γωνία 16 μοιρών που εκεί παρουσιάζεται μέγιστη τιμή του συντελεστή άνωσης, και ύστερα αρχίζει να μειώνεται με παραπέρα αύξηση της γωνίας πρόσπτωσης.



Εικόνα 3.2.10α- Διάγραμμα του συντελεστή c_d συναρτήσει της γωνίας πρόσπτωσης για την περίπτωση του πλέγματος μέσα στη σήραγγα(όνομα 'test section') και για τη περίπτωση όπου η αεροτομή είναι εκτεθειμένη σε ελεύθερο ρεύμα αέρα(όνομα '50c').



Εικόνα 3.2.10β-Περιοχή του ελάχιστου συντελεστή c_d συναρτήσει της γωνίας πρόσπτωσης για τα πλέγματα της σήραγγας(όνομα 'test section' και των 50 χορδών(όνομα '50c')

Από το διάγραμμα $cd-\alpha$ (εικόνα 3.2.10α) είναι φανερό πως μέχρι τη γωνία 12 μοιρών περίπου έχουμε ταύτιση των δύο καμπυλών (δηλαδή της καμπύλης με όνομα '50c' και της καμπύλης με όνομα 'test section'), και ύστερα αρχίζουν να απομακρύνονται μεταξύ τους. Στο διάγραμμα της εικόνας 3.2.10β παρατηρούμε την περιοχή των ελαχίστων συντελεστών αντίστασης cd των δύο πλεγμάτων. Ο ελάχιστος συντελεστής για το πλέγμα των 50 χορδών είναι ίσος με $cd_{min}=0.012$ σε γωνία πρόσπτωσης ίση με -2 μοίρες και για το πλέγμα της σήραγγας είναι ίσος με $cd_{min}=0.0124$ και παρουσιάζεται σε γωνία πρόσπτωσης ίση με -2 μοίρες.

3.2.3 Συμπεράσματα

Στην παρούσα ενότητα σκοπός μας ήταν η μελέτη της επίδρασης των τοιχωμάτων της αεροσήραγγας πάνω στις μετρήσεις στις δύο διαστάσεις. Γι αυτό το σκοπό δημιουργήσαμε το πλέγμα μέσα στη σήραγγα. Ο καθορισμός του αριθμού, και του τύπου των κελιών ήταν το επόμενο βήμα. Μελετήσαμε τη δομή με τριγωνικά και ορθογωνικά κελιά και τελικά καταλήξαμε πως τα ορθογωνικά κελιά είναι καλύτερα από άποψη ποσότητας αλλά και ακρίβειας αποτελεσμάτων. Επόμενο βήμα ήταν ο έλεγχος οριακού στρώματος πάνω στα τοιχώματα της σήραγγας και αν αυτός επηρεάζει τα αποτελέσματα. Παρατηρήθηκε πως η ύπαρξη του δεν τα επηρεάζει. Στη συνέχεια ελέγχθηκε η παρουσία του αποκλίνοντος και συγκλίνοντος τμήματος της σήραγγας και το αν επηρεάζει τις μετρήσεις. Η παράμετρος που καθόριζε αν επηρεάζει ή όχι το κάθε τμήμα από αυτά τις μετρήσεις ήταν η σύγκριση των cl , cd εν παρουσία των τμημάτων με τους αντίστοιχους όταν υπάρχει μόνο το τμήμα του θαλάμου δοκιμών. Επίσης τα διαγράμματα κατανομής πίεσης έδειξαν τα ίδια αποτελέσματα, δηλαδή πως η κατανομή της πίεσης πάνω στην αεροτομή δεν επηρεάζεται από την ύπαρξη του συγκλίνοντος και αποκλίνοντος τμήματος. Τελικά η ανάλυση καθόρισε πως το πλέγμα μέσα στη σήραγγα και συγκεκριμένα μέσα στο θάλαμο δοκιμών χωρίς την ύπαρξη άλλου τμήματος είναι αρκετά ικανοποιητικό από μόνο του να δώσει ακριβή αποτελέσματα. Όλα τα

παραπάνω αφορούν τις δύο διαστάσεις. Το τι συμβαίνει στις τρεις διαστάσεις είναι κάτι που θα μελετηθεί σε επόμενο κεφάλαιο.

3.3 Σύγκριση των διαφορών του πλέγματος με και χωρίς τις διορθώσεις σήραγγας. Πως αυτές οι διαφορές συγκρίνονται με τις διορθώσεις της βιβλιογραφίας;

3.3.1 Περιγραφή

Σχετικά με τις επιπτώσεις των τοιχωμάτων στη ροή, έχει προταθεί μεγάλος αριθμός διορθώσεων των πειραματικών μετρήσεων που πηγάζουν είτε απο θεωρητική ανάλυση είτε από εμπειρική πληροφορία. Οι διορθώσεις αυτές σχετίζονται με τον τύπο της αεροσήραγγας (κλειστού ή ανοικτού τύπου), αλλά και τη μορφή διατομής (τετραγωνική, κυλινδρική, οκταγωνική) αλλά και από το είδος της ροής (υποηχητική, διαηχητική ή υπερηχητική, μόνιμη ή όχι διδιάστατη ή τριδιάστατη).

-Διορθώσεις στένωσης

Βασική επίδραση των τοιχωμάτων στη ροή έχει να κάνει με τη στένωση που δημιουργούν το μετρούμενο πρότυπο και ο ομόρρους του. Ως εκ τούτου οι γραμμές ροής τροποποιούνται σε σύγκριση με τις αντίστοιχες μιας ροής απουσία τοιχωμάτων. Σε μια τέτοια περίπτωση το πρότυπο βλέπει απέρατη ταχύτητα

$$U + \Delta U_b$$

Όπου U είναι η ονομαστική ταχύτητα της επ άπειρον ροής και ΔU_b το σύνολο των επαγωγών ταχύτητας λόγω στένωσης. Για την εκτίμηση της μεταβολής της ταχύτητας ορίζεται ο συντελεστής στένωσης (blockage factor)

$$\mathcal{E}_b = \mathcal{E}_{sb} + \mathcal{E}_{wb}$$

ως άθροισμα των δύο επιμέρους επιρροών λόγω στένωσης (εκτοπίσματος και ομόρρου)

-Διορθώσεις εκτοπίσματος

Ένας τύπος υπολογισμού της ποσοστιαίας αύξησης της επαγόμενης ταχύτητας λόγω εκτοπίσματος(Thom,1943):

$$\varepsilon_{sb} = \frac{K_1 \cdot (\text{model_volume})}{C^{3/2}}$$

Όπου $k_1=0.74$ για πτέρυγα που εκτείνεται καθ'όλο το εύρος της σήραγγας και μία αξιόπιστη προσέγγιση για τον όγκο του προτύπου δίνεται από τη σχέση $[0.7 \times \text{πάχος} \times \text{μήκος} \times \text{εκπέτασμα}]$. Επίσης ο συντελεστής C εκφράζει τη διατομή του τμήματος δοκιμών.

-Διόρθωση ομόρρου

Κάθε σώμα γύρω από το οποίο υπάρχει ροή, "αφήνει" ομόρρου στον οποίο η μέση ταχύτητα είναι μικρότερη της απέρατης και εκτός αυτού μεγαλύτερη. Σύμφωνα με μια λεπτομερή ανάλυση (Maskell,1965) για ασυμπίεστο ρευστό ισχύει ο τύπος:

$$\varepsilon_{wb} = \frac{c/h}{2} \cdot cd_{un}$$

Ο συντελεστής αντίστασης cd_{un} αναφέρεται στην μη διορθωμένη τιμή του συντελεστή, δηλαδή όπως προκύπτει από τον υπολογισμό με την επίδραση των τοιχωμάτων.

Έτσι οι διορθωμένες τιμές των συντελεστών άνωσης και αντίστασης, δηλαδή οι συντελεστές όπως προκύπτουν αφαιρώντας την επίδραση των τοιχωμάτων δίδονται από τους παρακάτω τύπους:

$$cl_{cor} = cl_{un}(1 - \sigma - 2\varepsilon)$$

$$cd_{cor} = cd_{un}(1 - 3\varepsilon_{sb} - 2\varepsilon_{wb})$$

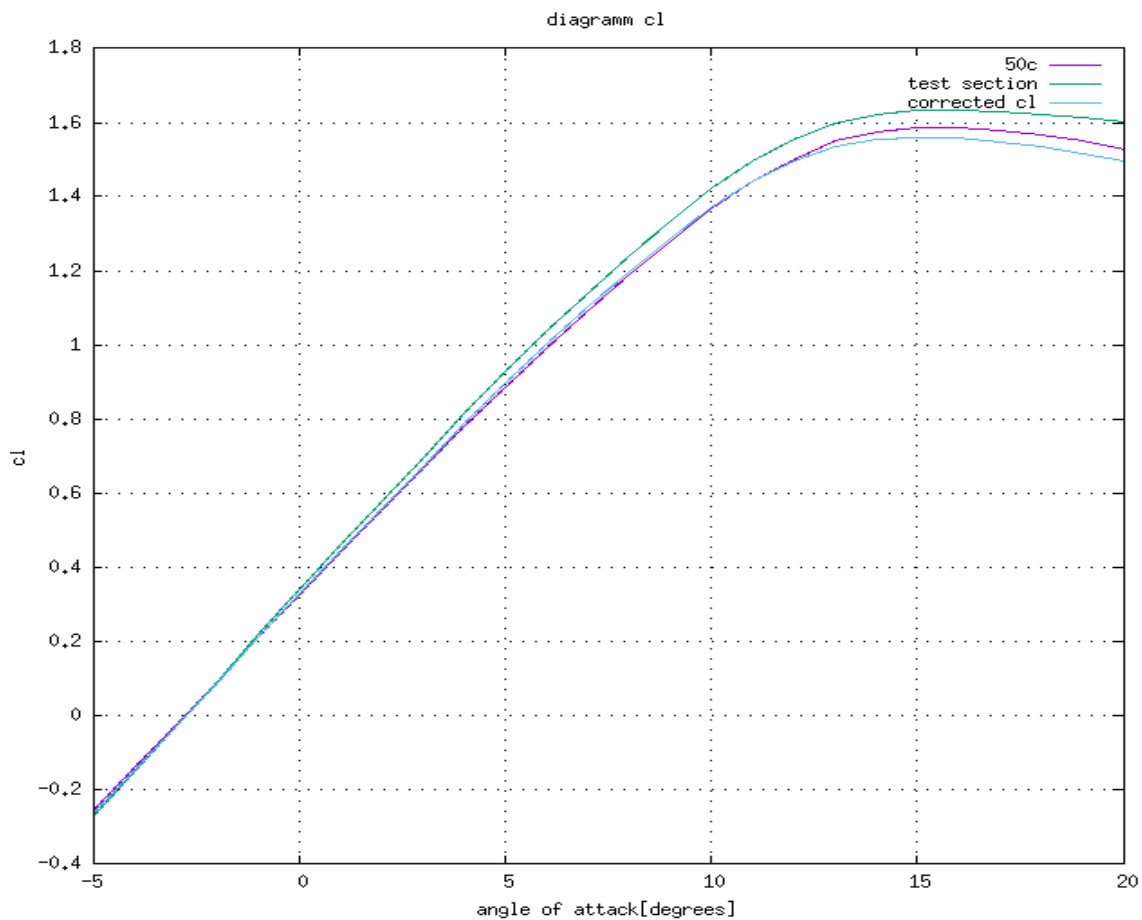
όπου με το δείκτη 'cor' αναφέρονται οι διορθωμένες τιμές και με τον δείκτη 'un' αναφέρονται οι μη-διορθωμένες τιμές όπως προκύπτουν από

τις μετρήσεις στην αεροσήραγγα. Επίσης η ποσότητα σ σχετίζεται με τη χορδή (c) και το ύψος του καναλιού (h), και είναι ίση με:

$$\sigma = \frac{\pi^2}{48} \left(\frac{c}{h} \right)^2$$

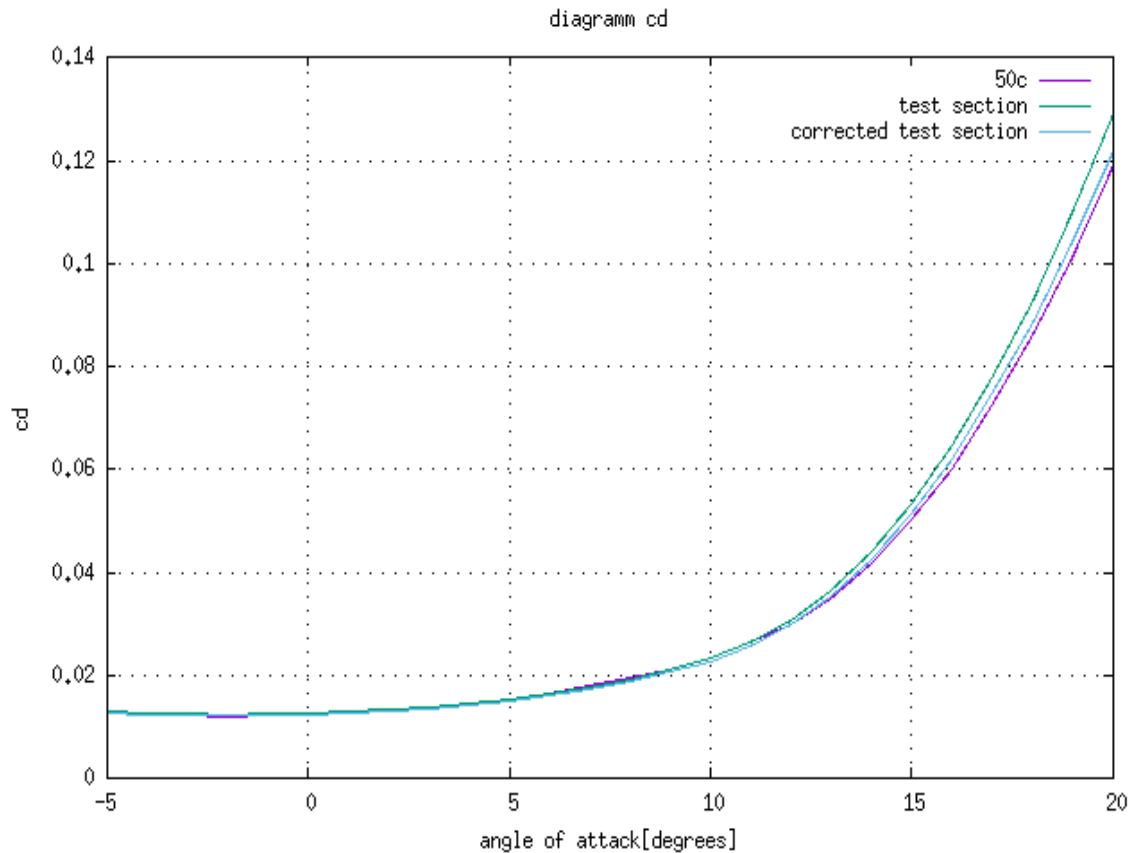
Χρησιμοποιώντας λοιπόν τους παραπάνω διορθωτικούς τύπους παράγουμε τους διορθωμένους συντελεστές c_l , c_d σε κάθε γωνία πρόσπτωσης και επομένως το διορθωμένο διάγραμμα των συντελεστών c_l, c_d συναρτήσει της γωνίας πρόσπτωσης.

3.3.2 Αποτελέσματα



Εικόνα 3.3.1- Διάγραμμα του συντελεστή άνωσης συναρτήσει της γωνίας πρόσπτωσης για τρεις περιπτώσεις.α)καμπύλη που προκύπτει όταν η αεροτομή είναι εκτεθειμένη σε ελεύθερο ρεύμα αέρα(όνομα

‘50c’), β) καμπύλη που προκύπτει όταν η αεροτομή είναι μέσα στη σήραγγα(όνομα ‘test section’) και γ) καμπύλη που αντιστοιχεί στις διορθωμένες τιμές των συντελεστών άνωσης και αντίστασης(όνομα ‘corrected test section’).



Εικόνα 3.3.2- Διάγραμμα του συντελεστή αντίστασης συναρτήσει της γωνίας πρόσπτωσης για τρεις περιπτώσεις: α) καμπύλη που προκύπτει όταν η αεροτομή είναι εκτεθειμένη σε ελεύθερο ρεύμα αέρα (όνομα ‘50c’), β) καμπύλη που προκύπτει όταν η αεροτομή είναι μέσα στη σήραγγα (όνομα ‘test section’) και γ) καμπύλη που αντιστοιχεί στις διορθωμένες τιμές των συντελεστών άνωσης και αντίστασης (όνομα ‘corrected test section’).

3.3.3 Συμπεράσματα

Αξίζει να παρατηρήσουμε πως η διορθωμένη καμπύλη τόσο του c_l , όσο και του c_d προσεγγίζει την καμπύλη 50c .

Για τη καμπύλη c_l -α παρατηρούμε επίσης πως η διορθωμένη καμπύλη και η καμπύλη 50c ταυτίζονται μέχρι περίπου τις 12 μοίρες. Ενώ το ίδιο παρατηρείται και στο διάγραμμα c_d -α. Μετά από αυτή την γωνία παρατηρούμε την απομάκρυνση των δύο καμπυλών, πιθανόν οφειλόμενο

σε τριδιάστατες επιδράσεις της ροής που εδώ δεν έχουν συμπεριληφθεί μιας και η μέχρι τώρα μελέτη αφορούσε τις δύο διαστάσεις.

3.4 Τριδιάστατη ανάλυση των πλεγμάτων 50 χορδών και σήραγγας

Όλες οι προηγούμενες μελέτες ασχολήθηκαν με την επίδραση των τοιχωμάτων της αεροσήραγγας στις δύο διαστάσεις. Επόμενο βήμα είναι η μελέτη της επίδρασης που έχουν τα τοιχώματα στις τρεις διαστάσεις που αφορούν και την πραγματικότητα. Γι αυτόν το λόγο θα γίνουν τριδιάστατα τα πλέγματα της σήραγγας ,και των 50 χορδών ώστε να είναι εφικτή η μελέτη. Μια επιπλέον δυσκολία αφού πλέον στις τρεις διαστάσεις κάνουν εμφάνιση τριδιάστατα φαινόμενα αποκόλλησης της ροής κατα μήκος της πτέρυγας, καθώς επίσης παρατηρούμε και την εμφάνιση τριδιάστατων φαινομένων όπως stall cells. Τα stall cells αποτελούν τριδιάστατα πρότυπα που παρατηρούνται στην πλευρά υποπίεσης της πτέρυγας, δηλαδή στη πάνω πλευρά της πτέρυγας στην οποία η ταχύτητα του διερχόμενου αέρα είναι μεγάλη. Έρευνες έχουν δείξει πως τα stall cells επηρεάζονται από την γωνία πρόσπτωσης, τον αριθμό Reynolds, το σχήμα της πτέρυγας καθώς και από την αναλογία του μήκους της από άκρο σε άκρο πτέρυγας με το μήκος της χορδής. Η τοπολογία τους περιγράφεται ως ένα ζεύγος δινών που περιστρέφονται με αντίθετη φορά και εμφανίζονται στην περιοχή αποκόλλησης της ροής και εκτείνονται μακριά της ακμής εκφυγής της πτέρυγας.

3.4.1 Τριδιάστατη ανάλυση του πλέγματος της σήραγγας

3.4.1.1 Περιγραφή

Ξεκινάμε κάνοντας τριδιάστατο το πλέγμα της αεροσήραγγας. Αυτό θα προκύψει δημιουργώντας μια γραμμή που ξεκινά από το σημείο $(x=0.35, y=0, z=0)$ και καταλήγει στο σημείο $(x=0.35, y=0, z=2)$ του προγράμματος ANSYS. Αυτή τη γραμμή που την ονομάζουμε κεντρική γραμμή την χωρίζουμε σε 20 διαστήματα, δηλαδή δημιουργούμε 21 κόμβους. Έτσι ο συνολικός αριθμός των κελιών είναι τώρα 892880. Αυτό που θέλουμε να ελέγξουμε είναι πάλι το πλήθος των κελιών κατα μήκος της κεντρικής γραμμής, και την τριδιάστατη αποκόλληση της ροής στις

γωνίες πρόσπτωσης που εμφανίζεται. Μια πρώτη εκτίμηση των συντελεστών cl , cd για αυτό το πλέγμα είναι

	cl	cd	$Errcl(\%)$	$Errcd(\%)$
Διδιάστατο πλέγμα	0.3397	0.01267	0.1	0.4
Τριδιάστατο πλέγμα	0.3394	0.01262		

Παρατηρούμε πως το σχετικό σφάλμα των cl, cd μεταξύ του 2d και 3d πλέγματος της σήραγγας είναι πολύ μικρότερο της μονάδας.

3.4.1.2 Αποτελέσματα

Έλεγχος ανεξαρτησίας του πλέγματος κατα μήκος του άξονα z

Εδώ θα καθορίσουμε τον αριθμό των διαμερίσεων στην κεντρική γραμμή, και άρα του αριθμού των κελιών στην τρίτη διάστατη. Αυτό θα προκύψει μέσω των δύο επόμενων ελέγχων:

- i. Δημιουργούμε το ίδιο πλέγμα αλλά με μήκος εκπετάσματος ίσο με μια χορδή και 20 διαμερίσεων (21 κόμβοι) στη κεντρική γραμμή και σύγκριση με το ίδιο μήκος αλλά με 11 κόμβους.
- ii. Σύγκριση του πλέγματος με πτέρυγα που έχει μήκος εκπετάσματος ίσο με 2 χορδές και 21 κόμβων στη κεντρική γραμμή και του πλέγματος με πτέρυγα που έχει μήκος εκπετάσματος ίσο με μία χορδή και έχει 11 κόμβους στη κεντρική γραμμή.

Όλα τα παραπάνω τα ελέγχουμε στις 16 μοίρες γωνία πρόσπτωσης της αεροτομής που αποτελεί και τη γωνία που παρουσιάζεται η μέγιστη τιμή του συντελεστή άνωσης cl για τη περίπτωση που η αεροτομή είναι μέσα στη σήραγγα.

Για κάθε περίπτωση ο έλεγχος για το ποιο πλέγμα ,δηλαδή αριθμό κελιών στη κεντρική γραμμή και μήκος εκπετάσματος πτέρυγας, θα κρατήσω θα γίνει μέσω τριών παραμέτρων:

1. Συγκρίνοντας τα σχετικά σφάλματα των συντελεστών cl και cd .
2. Να συγκρίνουμε το πρώτο σημείο από την ακμή πρόσπτωσης που παρατηρείται αποκόλληση της ροής των εκάστοτε περιπτώσεων και
3. Να ελέγξουμε τη δομή των στροβίλων καθ όλο το μήκος εκπετάσματος της πτέρυγας.

Αρχικά συγκρίνουμε τη πτέρυγα με μήκος εκπετάσματος ίσο με μία χορδή και 11 κόμβων στη κεντρική γραμμή με τη πτέρυγα με μήκος εκπετάσματος μίας χορδής και 21 κόμβων στη κεντρική γραμμή.

Εκπέτασμα πτέρυγας	cl	cd	$err(\%)-cl$	$err(\%)-cd$
1 χορδή				
21 κόμβοι	1.6301	0.0679		
11 κόμβοι	1.6384	0.06873	0.5	1.2

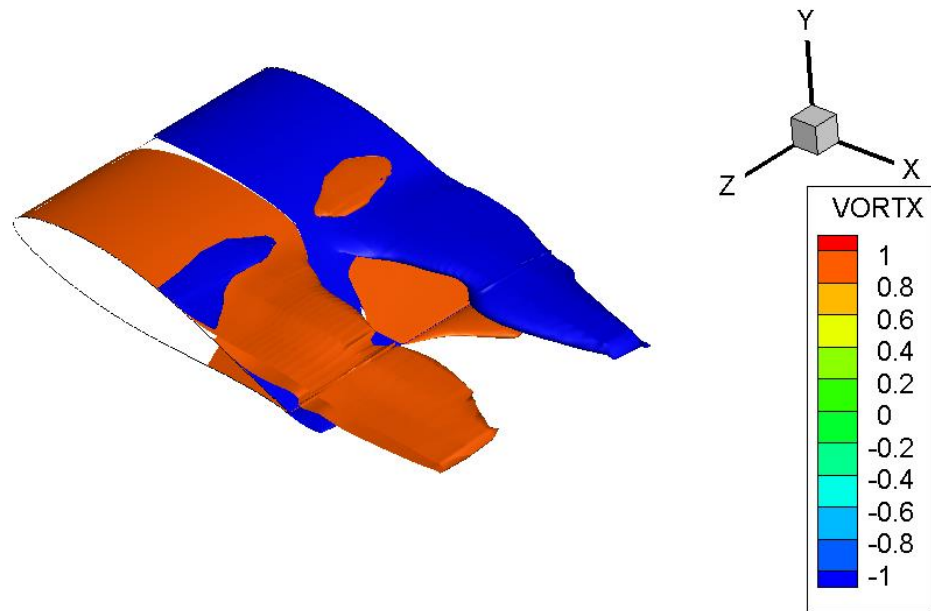
Το σημείο στο οποίο γίνεται η πρώτη εμφάνιση της αποκόλλησης της ροής για τις δύο περιπτώσεις θα είναι

-για τη πτέρυγα με 21 κόμβους στην κεντρική γραμμή είναι η θέση $x=0.521$

-για τη πτέρυγα με 11 κόμβους στη κεντρική γραμμή είναι η θέση $x=0.526$

Το μεταξύ τους σχετικό σφάλμα είναι 0.9%.Η διαφορά τους είναι αμελητέα

Όσον αφορά τη δομή των στροβίλων κατά μήκος του εκπετάσματος της πτέρυγας ,παρατηρούμε παρακάτω



Εικόνα 5.4.1-Δομή στροβίλων στην πτέρυγα που βρίσκεται μέσα στη σήραγγα ,και έχει μήκος εκπετάσματος ίσο με μία χορδή και 11 κόμβους στη τρίτη διάστατη και σε γωνία πρόσπτωσης 16 μοίρες.

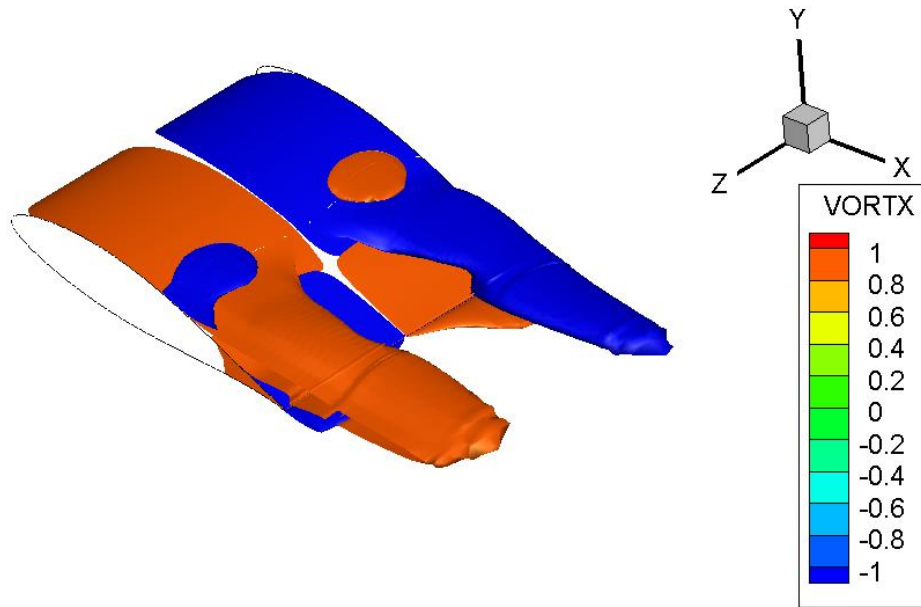
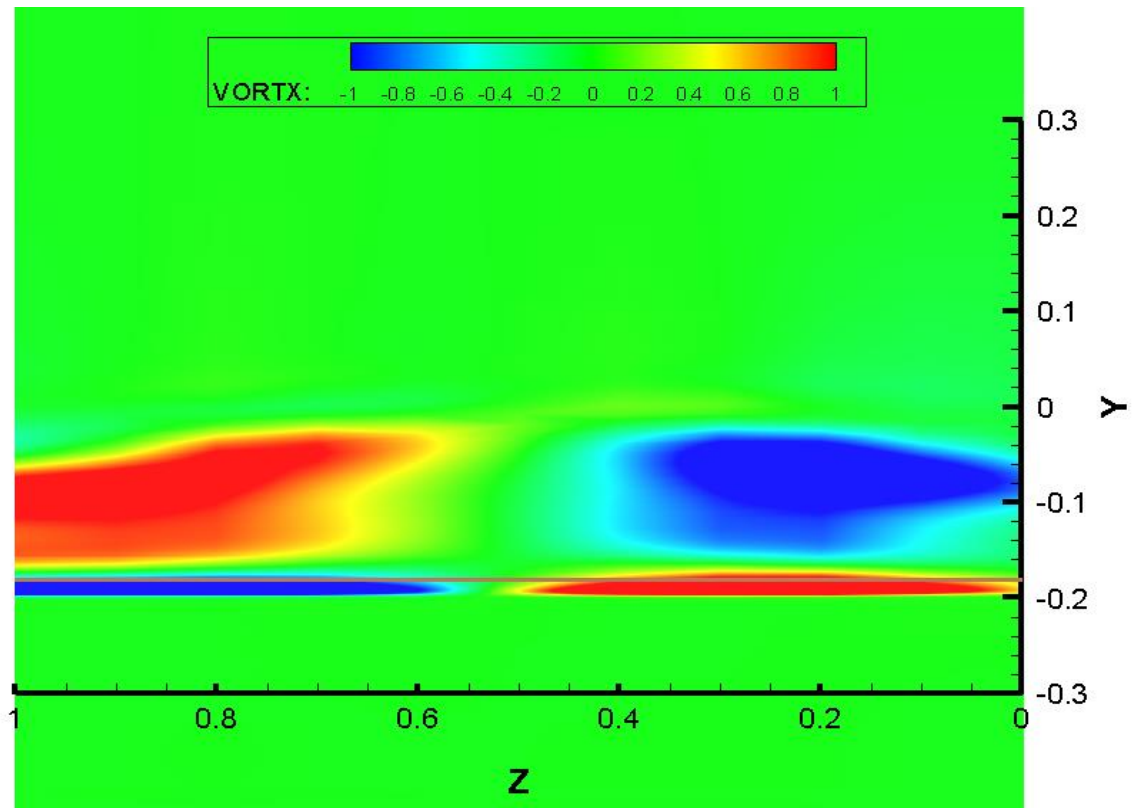


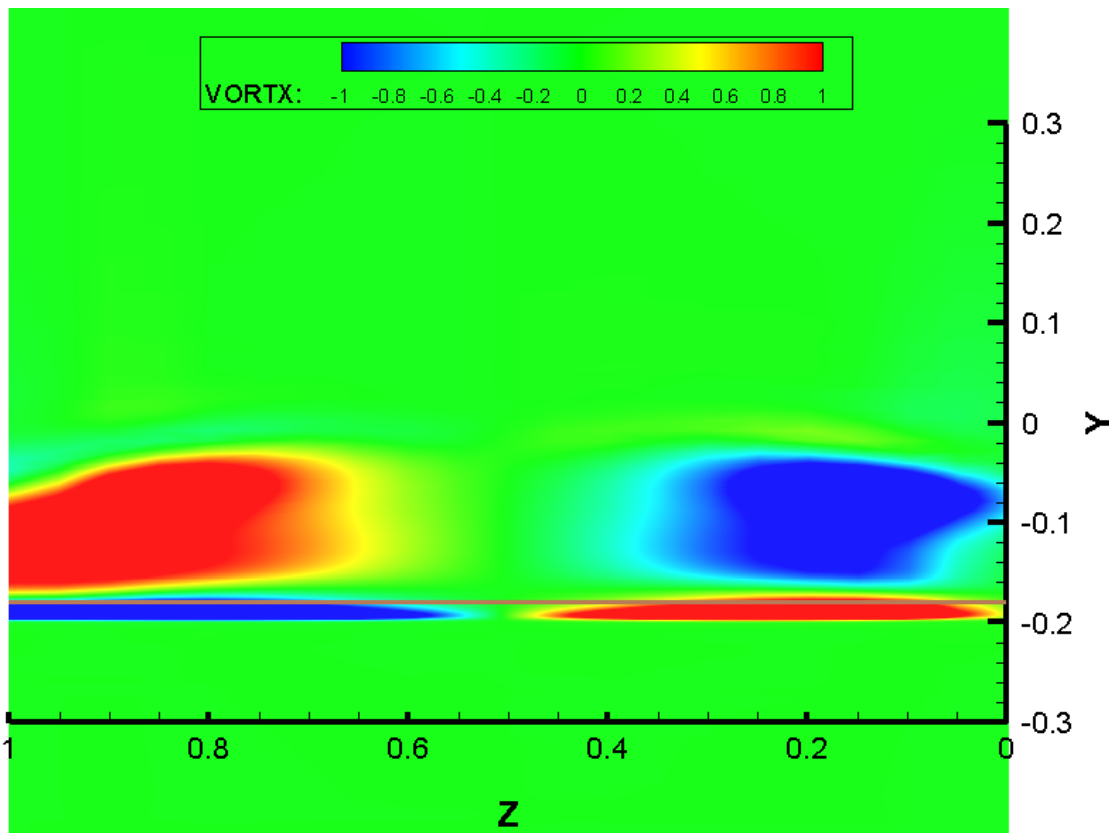
Figure 5.4.2- Δομή στροβίλων στην πτέρυγα που βρίσκεται μέσα στη σήραγγα και έχει μήκος εκπετάσματος ίσο με μία χορδή και 21 κόμβους στη τρίτη διάστατη και σε γωνία πρόσπτωσης 16 μοίρες.

Στις παραπάνω εικόνες παρατηρώ την ύπαρξη ενός ζεύγους αντίρροπων στροβίλων που εκτείνονται πιο μακριά από την ακμή εκφυγής. Το ζεύγος αυτών των στροβίλων αποτελούν ένα stall cell . Παρατηρούμε πως και στις δύο περιπτώσεις η δομή των στροβίλων είναι ίδια. Επομένως αφού ελέγξαμε τις τρεις παραμέτρους και είδαμε πως ικανοποιούνται εξάγουμε το συμπέρασμα πως το πλέγμα με τη πτέρυγα της μίας χορδής και των 11 κόμβων μπορούμε να το κρατήσουμε μιας και δίνει τα ίδια αποτελέσματα με το πλέγμα της πτέρυγας που έχει το ίδιο μήκος εκπετάσματος, αλλά με 21 κόμβους στη κεντρική γραμμή.

Στο σημείο αυτό είναι ενδιαφέρον να παρατηρήσουμε στον ομόρρο της πτέρυγας (θέση $x=1.1$) τι συμβαίνει και στις δύο περιπτώσεις, δηλαδή στη πτέρυγα με εκπέτασμα ίσο με μία χορδή και 11 κόμβους στην κεντρική γραμμή και στη πτέρυγα με εκπέτασμα ίσο με μία χορδή και 21 κόμβους στη κεντρική γραμμή.



Εικόνα 3.4.2-Δομή των στροβίλων στην ακμή εκφυγής της πτέρυγας (σε μια θέση λίγο μετά την ακμή εκφυγής) με μήκος εκπετάσματος μίας χορδής και 11 κόμβων στη κεντρική γραμμή. Η μπεζ γραμμή δείχνει τη θέση της ακμής εκφυγής της πτέρυγας.



Εικόνα 3.4.3- Δομή των στροβίλων στην ακμή εκφυγής της πτέρυγας(σε μια θέση λίγο μετά την ακμή εκφυγής) με μήκος εκπέτασματος μίας χορδής και 21 κόμβων στη κεντρική γραμμή. Η μπλε γραμμή δείχνει τη θέση της ακμής εκφυγής της πτέρυγας.

Παρατηρούμε πως στη περίπτωση των 21 κόμβων στον άξονα z οι στρόβιλοι στο κατάντι της πτέρυγας είναι πιο συμπυκνωμένοι, ενώ στη πιο πάνω περίπτωση απλώνονται περισσότερο. Η σχεδιασμένη γραμμή στα παραπάνω σχήματα είναι η θέση της ακμής εκφυγής της πτέρυγας.

Αφού ελέγξαμε τις τρεις παραμέτρους, μπορούμε να κρατήσουμε το πλέγμα με τη πτέρυγα που έχει εκπέτασμα ίσο με μια χορδή και 11 κόμβους στην κεντρική γραμμή (άξονας z).

Επόμενο βήμα είναι να συγκρίνουμε το πλέγμα με εκπέτασμα μίας χορδής και 11 κόμβων με το πλέγμα που έχει εκπέτασμα ίσο με 2 χορδές και 21 κόμβους στον άξονα z , μέσω των τριών γνωστών παραμέτρων.

Αρχικά θα ελέγξουμε τα σχετικά μεταξύ τους σφάλματα των συντελεστών cl, cd

	cl	cd	$err(\%)-cl$	$err(\%)-cd$
Εκπέτασμα 1 χορδή,11 κόμβοι	1.6384	0.06873	0.12	1.47
Εκπέτασμα 2 χορδές,21 κόμβοι	1.6364	0.06773		

Τα σχετικά σφάλματα των συντελεστών cl, cd είναι μικρά, με του cl να είναι μικρότερο της μονάδας ενώ του cd να έχει τιμή 1.47.

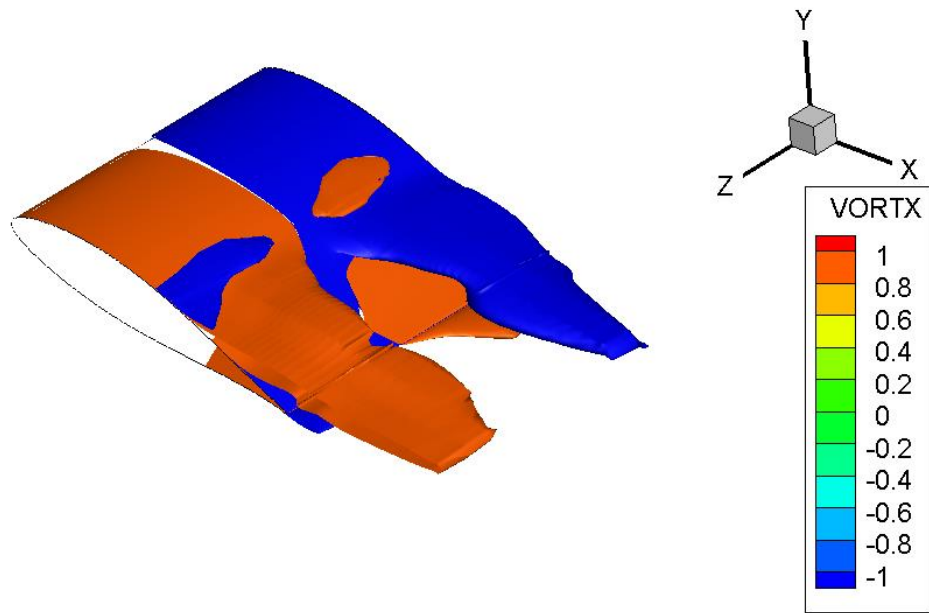
Ύστερα, τα σημεία που παρατηρείται πρώτα η αποκόλληση της ροής είναι

- $x=0.521$ για τη πτέρυγα με εκπέτασμα μία χορδή

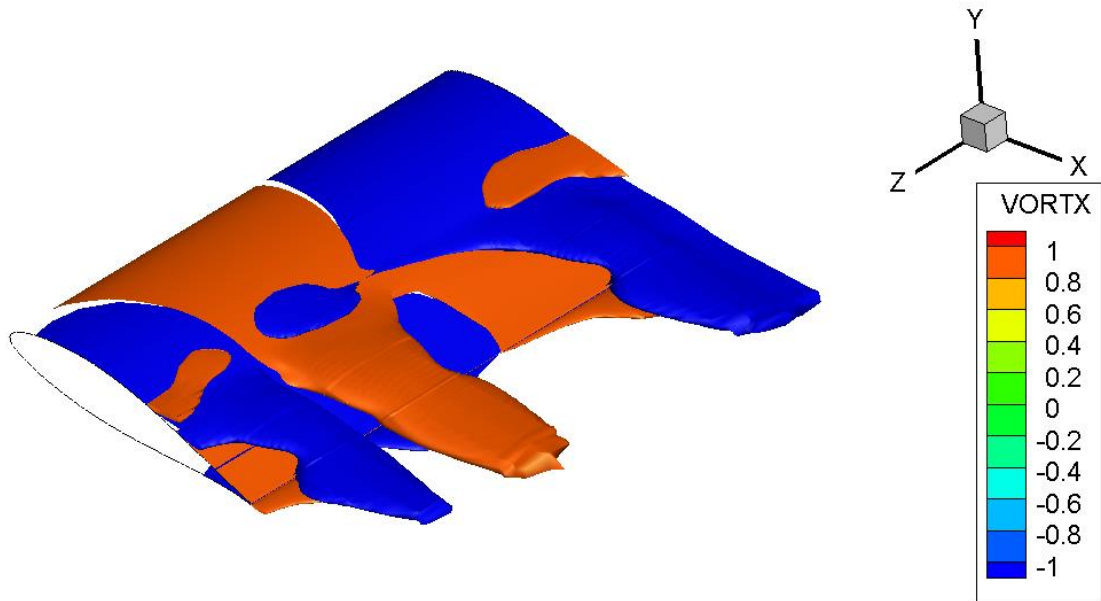
- $x=0.517$ για τη πτέρυγα με εκπέτασμα δύο χορδές.

Το μεταξύ τους σφάλμα είναι ίσο με 0.7%, ποσοστό που θεωρείται μικρό.

Όσον αφορά τη δομή των στροβίλων κατά μήκος του εκπετάσματος της πτέρυγας για τις δύο περιπτώσεις παρουσιάζονται οι παρακάτω εικόνες όπου η πρώτη αφορά τη πτέρυγα με εκπέτασμα μίας χορδής και 11 κόμβων στη κεντρική γραμμή, ενώ η δεύτερη αφορά τη πτέρυγα με εκπέτασμα δύο χορδών και 21 κόμβους στη κεντρική γραμμή.



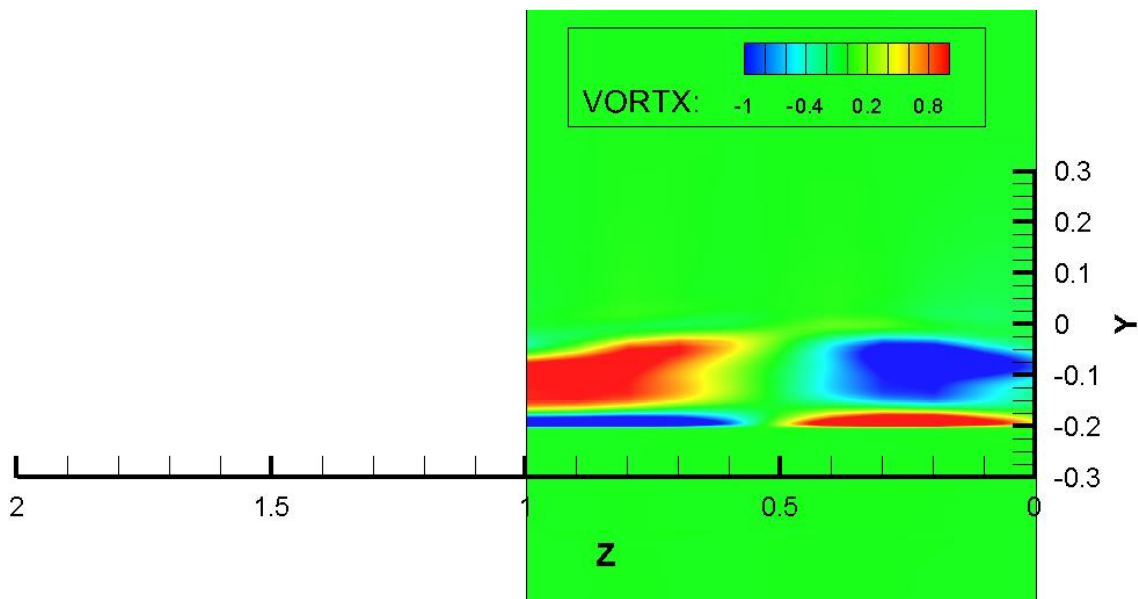
Εικόνα 3.4.4-Δομή των στροβίλων στην πτέρυγα με εκπέτασμα μία χορδή και 11 κόμβους στην κεντρική γραμμή σε γωνία πρόσπτωσης 16 μοίρες.



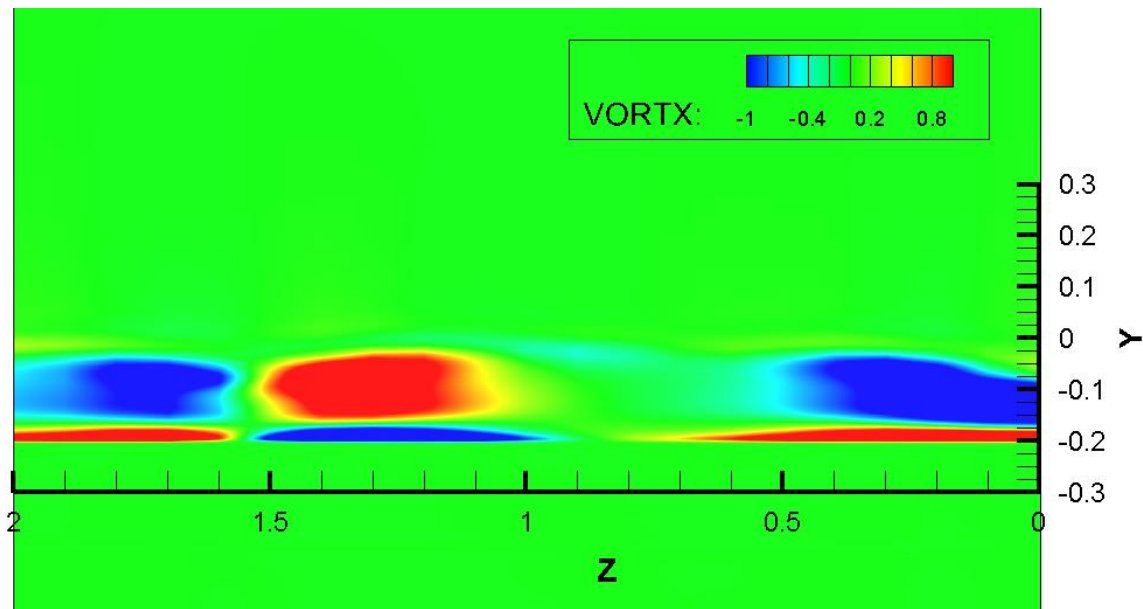
Εικόνα 3.4.5-Δομή των στροβίλων στην πτέρυγα με εκπέτασμα δύο χορδές και 21 κόμβους στην κεντρική γραμμή σε γωνία πρόσπτωσης 16 μοίρες.

Στη πρώτη εικόνα παρατηρούμε την ύπαρξη ενός stall cell (ένα ζεύγος στροβίλων αντίρροπων) , ενώ στη δεύτερη παρατηρούμε την ύπαρξη ενός μισού stall cell και ενός ολόκληρου stall cell.

Όμοια με πριν αξίζει να παρατηρήσουμε τι συμβαίνει στον ομόρρου της πτέρυγας και στις δύο περιπτώσεις, και συγκριμένα στη θέση $x=1.1$ (απόσταση από ακμή πρόσπτωσης)



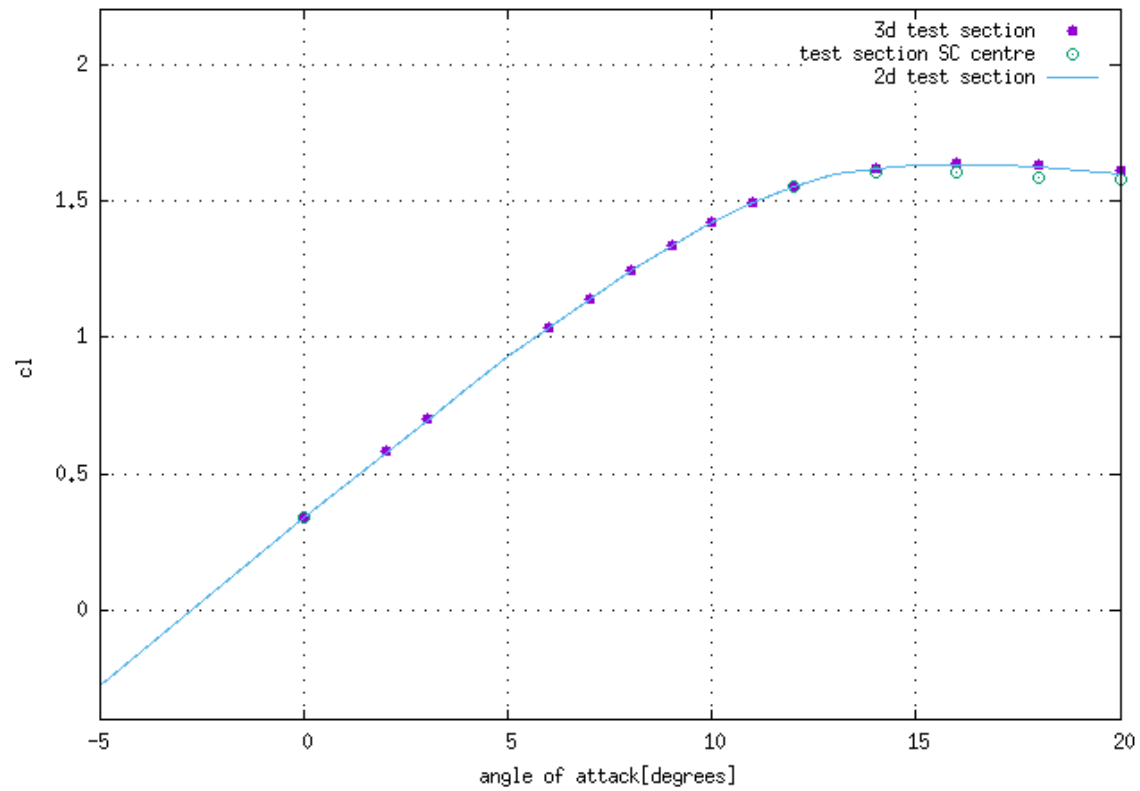
Εικόνα 3.4.6-Δομή στροβίλων στον ομόρρου της πτέρυγας (θέση $x=1.1$) με εκτέτασμα μίας χορδής και 11 κόμβους στη κεντρική γραμμή.



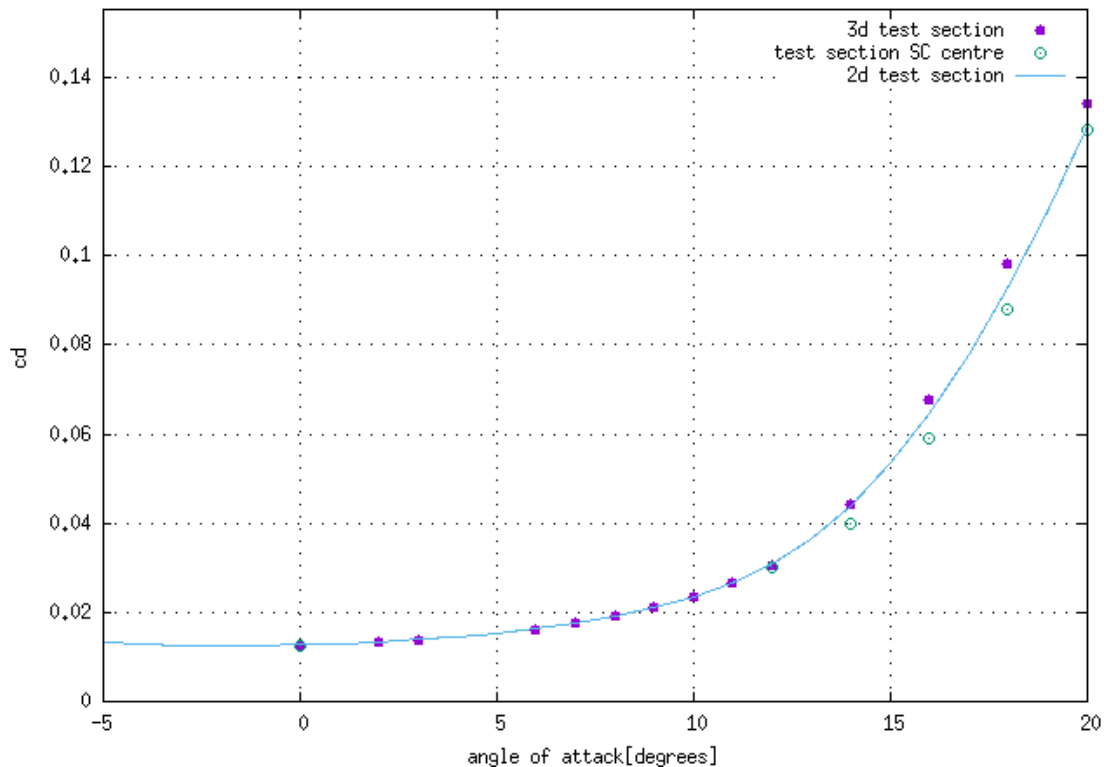
Εικόνα 3.4.7--Δομή στροβίλων στον ομόρρου της πτέρυγας (θέση $\chi=1.1$) με εκπέτασμα δύο χορδές και 21 κόμβους στη κεντρική γραμμή.

Παρατηρώντας τη διαφορά των στροβίλων καθ' όλο το μήκος της πτέρυγας στις δύο περιπτώσεις, συμπεραίνουμε πως η πτέρυγα μιας χορδής δεν δίνει ίδια αποτελέσματα με τη πτέρυγα των δύο χορδών. Επομένως κρατάμε τη πτέρυγα με μήκος δύο χορδές και 21 κόμβους στον άξονα z . Ο συνολικός αριθμός κελιών αυτού του πλέγματος είναι 1270500 κελιά.

Επόμενο βήμα είναι η δημιουργία του πολικού διαγράμματος των συντελεστών c_l, c_d , το οποίο δημιουργήθηκε για εύρος γωνιών πρόσπτωσης από -5 έως 20 μοίρες. Στα παρακάτω διαγράμματα σχεδιάζεται και η καμπύλη όπου χρησιμοποιούνται οι συντελεστές άνωσης και αντίστασης όπως έχουν υπολογιστεί στο κέντρο του stall cell της πτέρυγας.

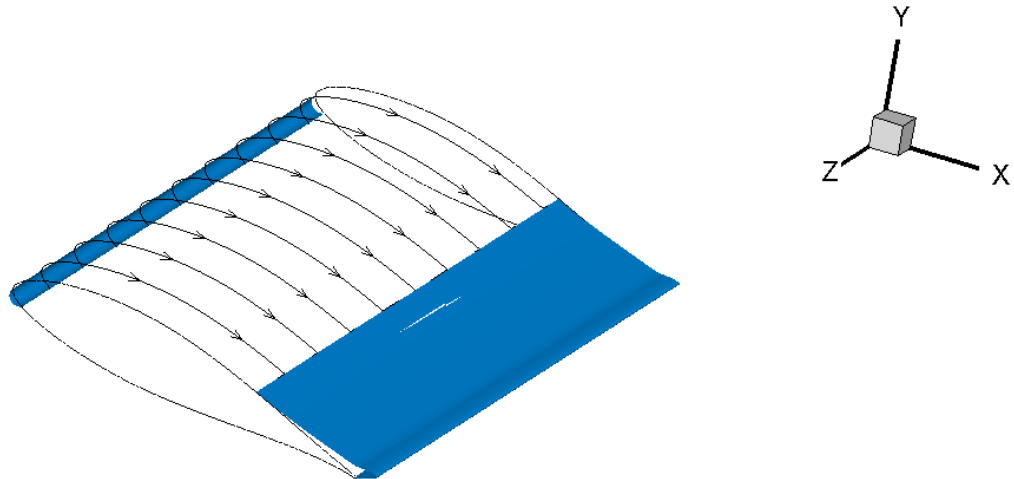


Εικόνα 3.4.8-Διάγραμμα του συντελεστή άνωσης συναρτήσει της γωνίας πρόσπτωσης. Η καμπύλη με όνομα '3d test section' αφορά το πλέγμα της σήραγγας στις τρεις διαστάσεις, η καμπύλη με όνομα '2d test section' αφορά το πλέγμα της σήραγγας στις δύο διαστάσεις, και η καμπύλη με όνομα 'test section SC centre' αφορά το πλέγμα της σήραγγας στις τρεις διαστάσεις, για το οποίο ο υπολογισμός των συντελεστών άνωσης c_l έγινε στο κέντρο του stall cell της πτέρυγας σε κάθε γωνία πρόσπτωσης.

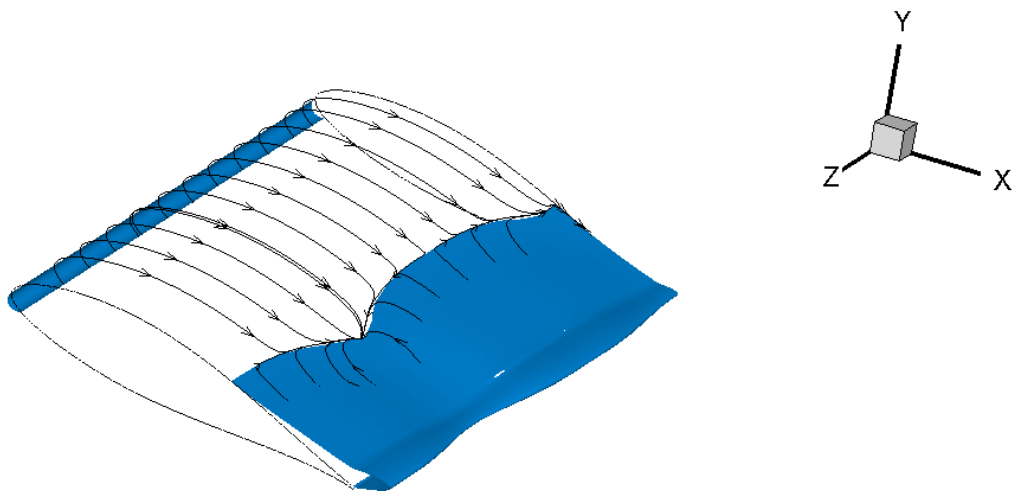


Εικόνα 3.4.9-Διάγραμμα του συντελεστή αντίστασης συναρτήσει της γωνίας πρόσπτωσης. Η καμπύλη με όνομα '3d test section' αφορά το πλέγμα της σήραγγας στις τρεις διαστάσεις, η καμπύλη με όνομα '2d test section' αφορά το πλέγμα της σήραγγας στις δύο διαστάσεις, και η καμπύλη με όνομα 'test section SC centre' αφορά το πλέγμα της σήραγγας στις τρεις διαστάσεις όπου ο συντελεστής αντίστασης είναι υπολογισμένος στο κέντρο του stall cell της πτέρυγας σε κάθε γωνία πρόσπτωσης.

Όσον αφορά το πλέγμα της σήραγγας στις δύο αλλά και στις τρεις διαστάσεις, μπορούμε να πούμε πως η καμπύλή της σήραγγας στις τρεις διαστάσεις ταυτίζεται με την αντίστοιχη στις δύο διαστάσεις μέχρι τις 13 μοίρες γωνία πρόσπτωσης, αφού μέχρι εκείνη τη γωνία η ροή πάνω στη πτέρυγα παραμένει διδιάστατη. Αυτό παρατηρείται και στα παραπάνω διαγράμματα των εικόνων 3.4.8 και 3.4.9 που παρουσιάζουν τις καμπύλες των συντελεστών άνωσης και αντίστασης συναρτήσει της γωνίας πρόσπτωσης. Επίσης για το τριδιάστατο πλέγμα να δούμε πως εξελίσσεται η αποκόλληση της ροής στις 13 και στις 14 μοίρες όπου γίνεται η μετάβαση από διδιάστατη αποκόλληση σε τριδιάστατη αποκόλληση. Έτσι, παίρνουμε τις παρακάτω εικόνες:



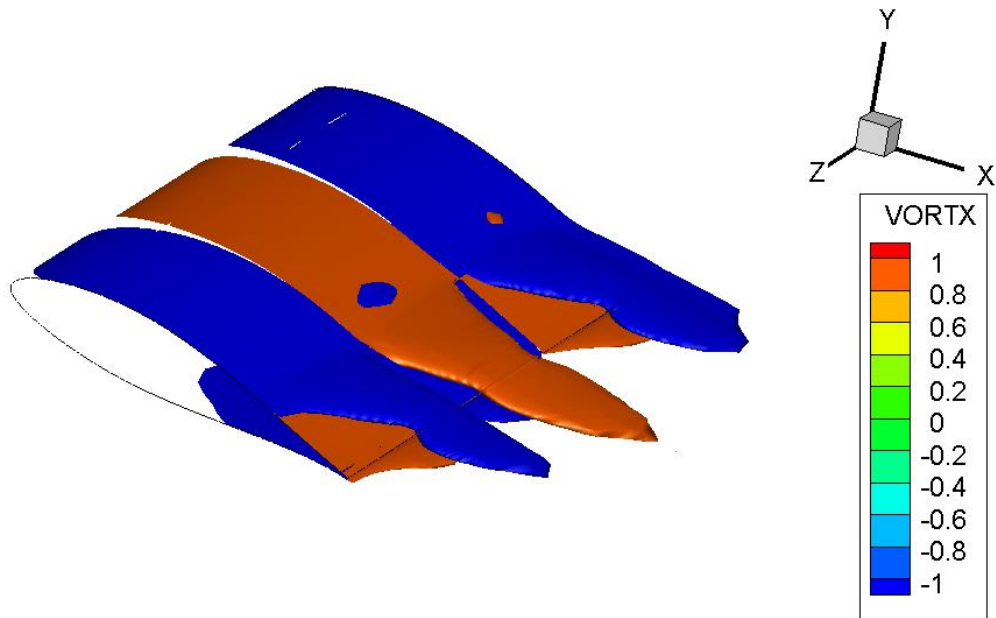
Εικόνα 3.4.10-Εικόνα που δείχνει την αποκολλημένη περιοχή (τμήμα με μπλε χρώμα) της πτέρυγας που βρίσκεται μέσα στη σήραγγα σε γωνία πρόσπτωσης 13 μοίρες. Η αποκόλληση της ροής συμβαίνει την ίδια στιγμή στο ίδιο σημείο σε όλο το μήκος του εκπετάσματος. Η αποκολλημένη ροή εδώ παραμένει διδιάστατη.



Εικόνα 3.4.11-Εικόνα που δείχνει την αποκολλημένη περιοχή (τμήμα με μπλε χρώμα) της πτέρυγας που βρίσκεται μέσα στη σήραγγα σε γωνία πρόσπτωσης 14 μοίρες. Η ροή αποκολλάται σε διαφορετικά σημεία κατά μήκος του εκπετάσματος της πτέρυγας.

Στην εικόνα 3.4.11 όπως είπαμε φαίνεται η τριδιάστατη αποκόλληση της ροής κατά μήκος του εκπετάσματος της πτέρυγας η οποία εμφανίζεται σε γωνία πρόσπτωσης 14 μοιρών.

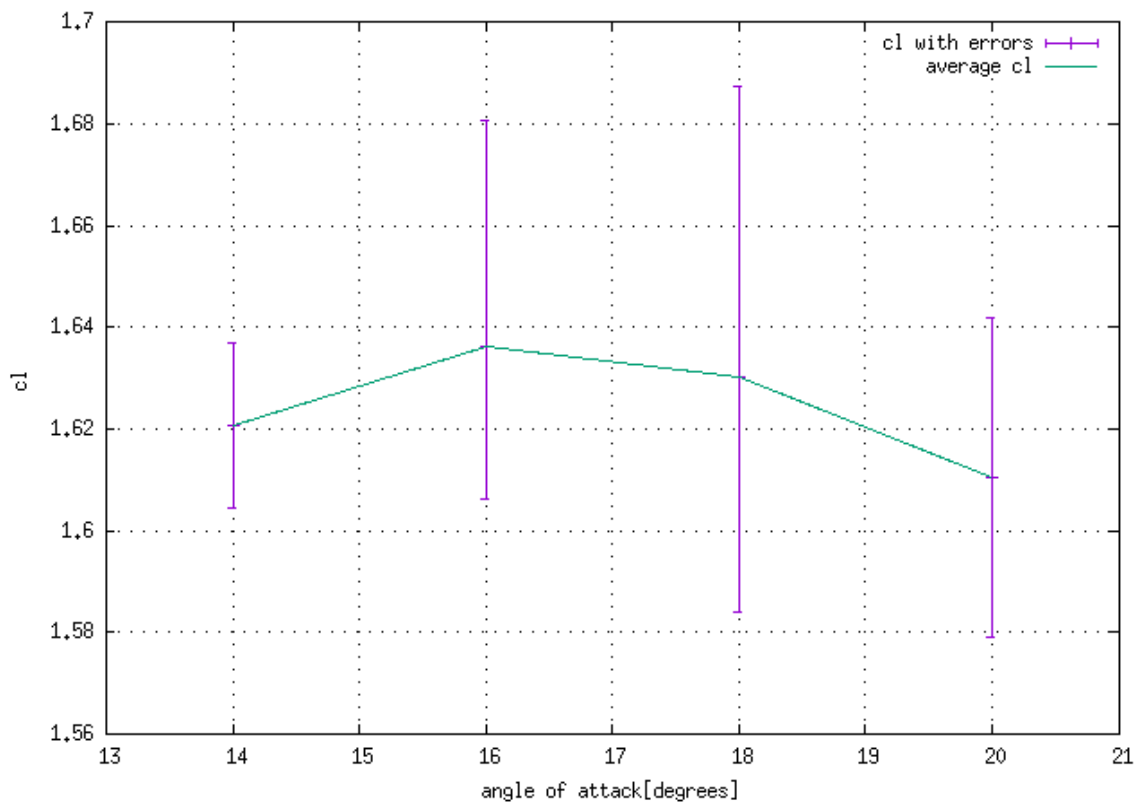
Στις 14 μοίρες μιας και αρχίζει η τριδιάστατη αποκόλληση είναι ενδιαφέρον να δούμε επίσης τι γίνεται με τη δομή των στροβίλων κατά μήκος του εκπετάσματος της πτέρυγας



Εικόνα 3.4.12α- Δομή στροβίλων κατά μήκος εκπετάσματος της πτέρυγας μέσα στη σήραγγα σε γωνία πρόσπτωσης 14 μοίρες.

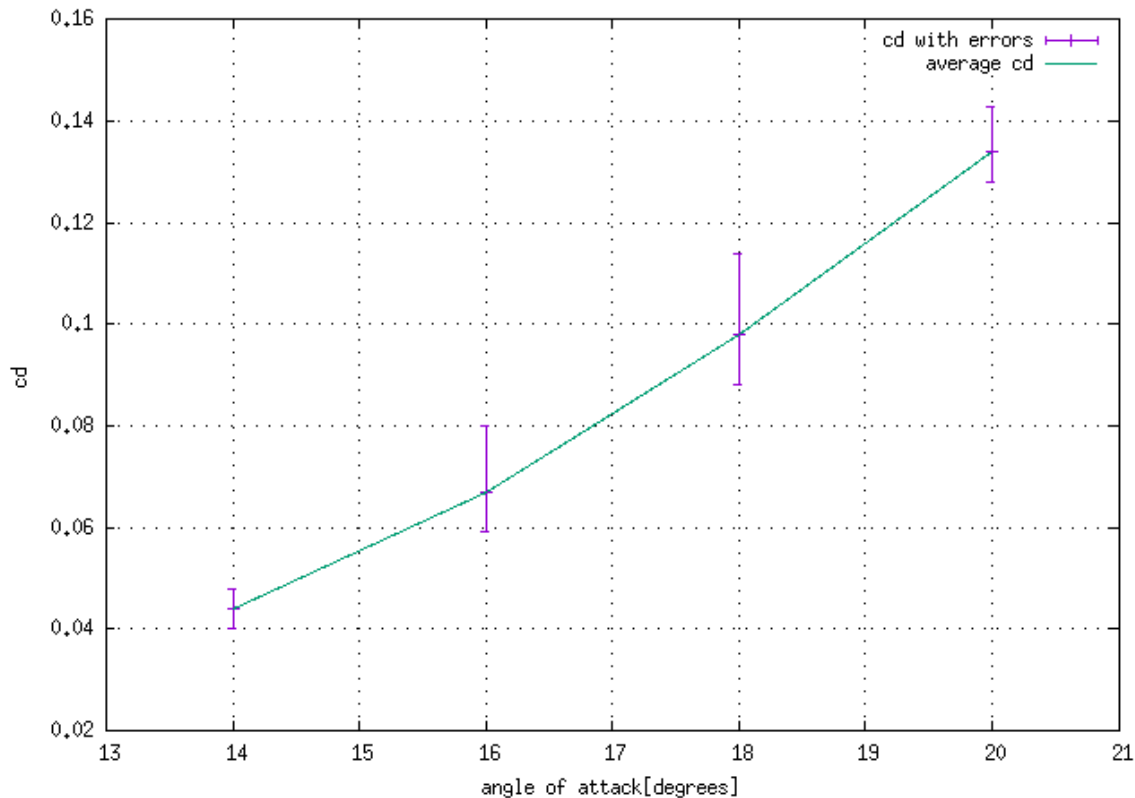
Παρατηρούμε παραπάνω στο διάγραμμα της πτέρυγας στις 14 μοίρες του test section την ύπαρξη τριών στροβίλων κατά το μήκος του εκπετάσματος της πτέρυγας. Ο μεσαίος στρόβιλος και αυτός που βρίσκεται τέρμα δεξιά αποτελούν ένα stall cell.

Στο παρακάτω διάγραμμα μπορούμε να παρατηρήσουμε την διακύμανση της καμπύλης του πλέγματος της σήραγγας



Εικόνα 3.4.12β- Διάγραμμα που δίνει σε κάθε γωνία πρόσπτωσης τις τρεις τιμές που παίρνει ο συντελεστής άνωσης, δηλαδή την μέση , την μέγιστη και την ελάχιστη τιμή του πάνω στη πτέρυγα.

Στο παραπάνω διάγραμμα δίνεται σε κάθε γωνία πρόσπτωσης ο μέσος συντελεστής άνωσης c_l και τα όρια του, που είναι η μέγιστη και η ελάχιστη τιμή του σε κάποια θέση πάνω στη πτέρυγα. Το διάγραμμα της εικόνας 3.4.12β σχεδιάστηκε για εύρος γωνιών από 14 έως 20 μοίρες, κι αυτό διότι πριν τις 14 μοίρες η ροή είναι διδιάστατη, οπότε οι τρεις τιμές (μέση, μέγιστη και ελάχιστη) ταυτίζονται. Παρακάτω παρατηρούμε το αντίστοιχο διάγραμμα για τον συντελεστή αντίστασης c_d :



Εικόνα 3.4.12γ- Διάγραμμα που δίνει σε κάθε γωνία πρόσπτωσης τις τρεις τιμές που παίρνει ο συντελεστής αντίστασης, δηλαδή τη μέση ,την μέγιστη και την ελάχιστη τιμή του πάνω στη πτέρυγα.

3.4.1.3 Συμπεράσματα

Όσον αφορά το τριδιάστατο πλέγμα μέσα στη σήραγγα ελέγξαμε εαν χρησιμοποιώντας το μισό εκπετάσμα της πτέρυγας θα πάρουμε τα ίδια αποτελέσματα με τη πτέρυγα εκπετάσματος δύο χορδών αλλά είδαμε πως διαφοροποιούνται οι στρόβιλοι κατά το μήκος του εκπετάσματος για τις δύο περιπτώσεις. Έτσι συνεχίζουμε την ανάλυση μας με την πτέρυγα η οποία έχει μήκος εκπετάσματος ίσο με δύο χορδές και 21 κόμβους πάνω στη κεντρική γραμμή. Τέλος το πλέγμα της σήραγγας στις τρεις διαστάσεις ταυτίζεται με το αντίστοιχο στις δύο διαστάσεις μέχρι τις 13 μοίρες γωνία πρόσπτωσης , δηλαδή μέχρι τη γωνία εκείνη που η ροή πάνω στη πτέρυγα παραμένει διδιάστατη.

Προκειμένου να μελετήσουμε την επίδραση που έχουν τα τοιχώματα της αεροσήραγγας στις τρεις διαστάσεις πρέπει εν συνεχεία να συγκρίνουμε

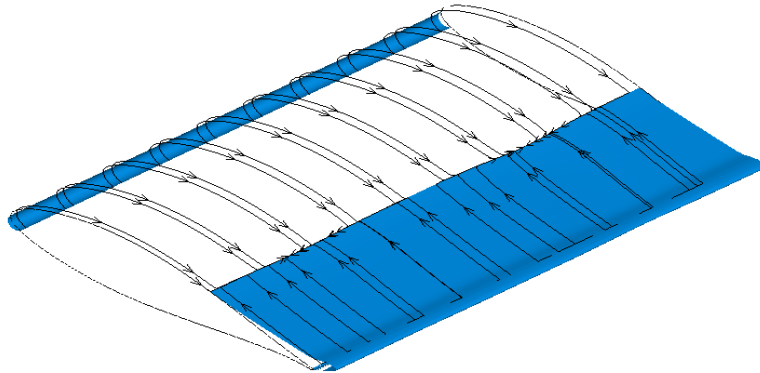
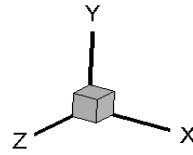
το τριδιάστατο πλέγμα της σήραγγας με το τριδιάστατο πλέγμα της πτέρυγας μέσα στο όριο των 50 χορδών.

3.4.2 Τριδιάστατη ανάλυση του πλέγματος των 50 χορδών

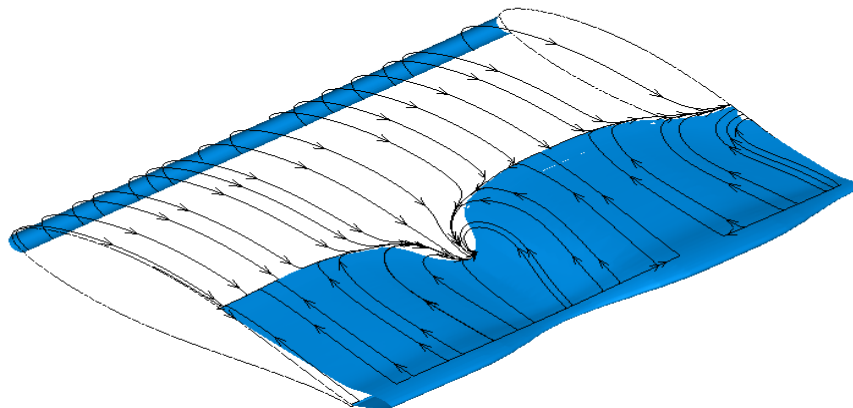
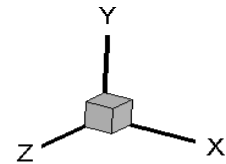
3.4.2.1 Περιγραφή

Σκοπός μας εδώ είναι να κάνουμε τριδιάστατο το πλέγμα των 50 χορδών, δηλαδή το πλέγμα στο οποίο η πτέρυγα είναι εκτεθειμένη στο ελεύθερο ρεύμα του αέρα, προκειμένου όπως λέχθηκε παραπάνω να συγκριθεί με το τριδιάστατο πλέγμα της σήραγγας. Όμοια με το πλέγμα της σήραγγας για να προκύψει το τριδιάστατο πλέγμα των 50 χορδών θα δημιουργηθεί μια γραμμή που ενώνει το σημείο ($x_1=0.35, y_1=0, z_1=0$) με το σημείο ($x_1=0.35, y_1=0, z_1=2$) πάνω στην οποία θα γίνουν 20 διαμερίσεις, δηλαδή θα δημιουργηθούν 21 κόμβοι. Το μήκος της γραμμής είναι ίσο με δύο χορδές και αποτελείται από 21 κόμβους. Ο συνολικός αριθμός των κελιών στο τριδιάστατο πλέγμα των 50 χορδών ανέρχεται σε 1270500 κελιά. Όλα τα παραπάνω πραγματοποιούνται με τη χρήση του ICEM CFD. Κατόπιν υπολογίζονται οι συντελεστές c_l, c_d για διάφορες γωνίες πρόσπτωσης.

3.4.2.2 Αποτελέσματα

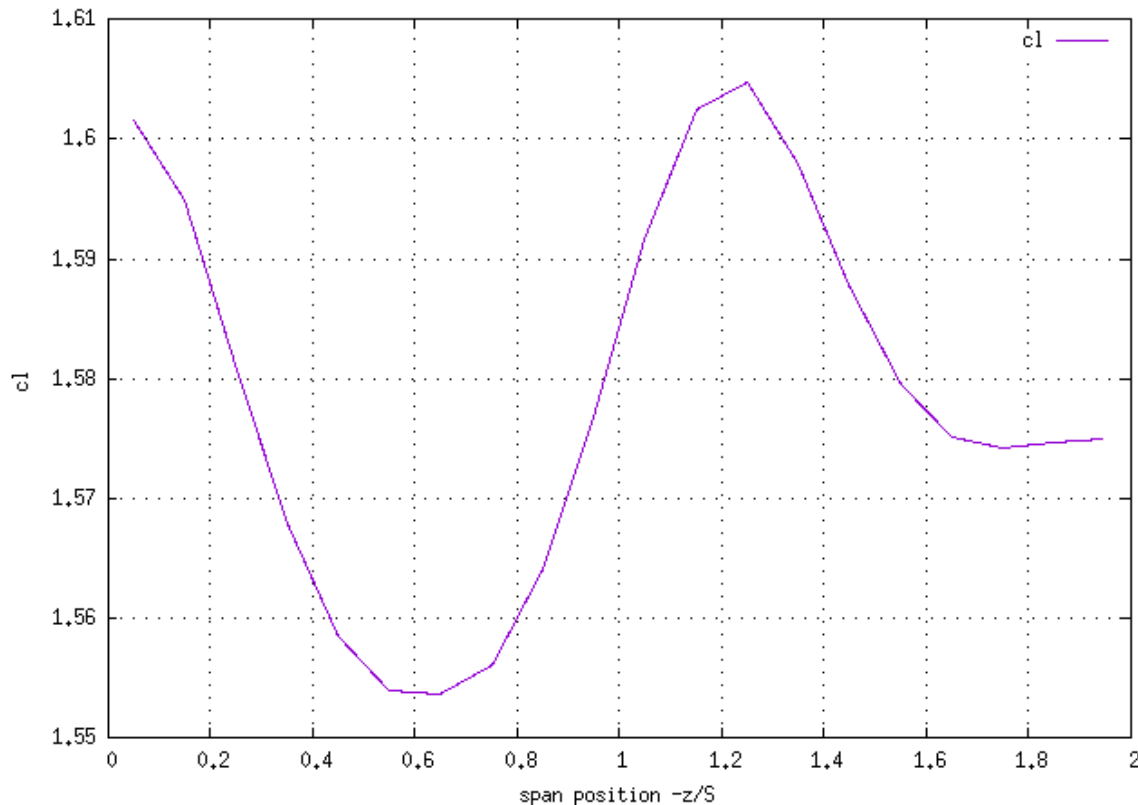


Εικόνα 3.4.13-Αποκόλληση της ροής στη πτέρυγα που είναι εκτεθειμένη σε ελεύθερο ρεύμα αέρα και σε γωνία πρόσπτωσης 14 μοίρες. Η αποκόλληση της ροής είναι διδιάστατη. Η χρωματισμένη περιοχή με μπλέ χρώμα αντιστοιχεί στην περιοχή στην οποία η ροή είναι αποκολλημένη.



Εικόνα 3.4.14α- Αποκόλληση της ροής στη πτέρυγα που είναι εκτεθειμένη σε ελεύθερο ρεύμα αέρα και σε γωνία πρόσπτωσης 15 μοίρες. Η αποκόλληση της ροής είναι τριδιάστατη. Η χρωματισμένη περιοχή με μπλέ χρώμα αντιστοιχεί στην περιοχή στην οποία η ροή είναι αποκολλημένη.

Στο διάγραμμα της εικόνας 3.4.14α παρατηρείται η εμφάνιση τριδιάστατης αποκόλλησης της ροής για τη περίπτωση του πλέγματος των 50 χορδών. Αυτό μπορεί να παρατηρηθεί και στο παρακάτω διάγραμμα-εικόνα 3.4.14β το οποίο δίνει την κατανομή του συντελεστή άνωσης κατά το μήκος εκπετάσματος της πτέρυγας στις 15 μοίρες:



Εικόνα 3.4.14β- Διάγραμμα κατανομής του συντελεστή c_l κατά το μήκος εκπετάσματος της πτέρυγας στις 15 μοίρες γωνία πρόσπτωσης όταν αυτή βρίσκεται εκτεθειμένη σε ελεύθερο ρεύμα αέρα.

Στο παραπάνω διάγραμμα-εικόνα 3.4.14β παρατηρείται η κατανομή του συντελεστή άνωσης της πτέρυγας όταν αυτή είναι εκτεθειμένη στο ελεύθερο ρεύμα αέρα και τοποθετημένη στις 15 μοίρες, που όπως λέχθηκε είναι η γωνία στην οποία εμφανίζεται τριδιάστατη αποκόλληση της ροής. Ο μέγιστος συντελεστής άνωσης εμφανίζεται στη θέση $z/S=1.25$, ενώ η ελάχιστη τιμή του στη θέση $z/S=0.65$. Επίσης οι συνθήκες που έχουμε

ορίσει στα άκρα της πτέρυγας μέσω του ICEM CFD είναι συνθήκες ολίσθησης, δηλαδή τοίχωμα με μηδενικό ιξώδες.

3.4.2.3 Συμπεράσματα

Στις 15 μοίρες γωνία πρόσπτωσης αρχίζουν να παρουσιάζονται φαινόμενα τριδιάστατης αποκόλλησης της ροής και μέχρι τις 14 μοίρες η αποκόλληση της ροής για τη περίπτωση του τριδιάστατου πλέγματος 50 χορδών παραμένει διδιάστατη. Είναι σημαντικό σε αυτό το σημείο να αναφέρουμε πως στη περίπτωση του τριδιάστατου πλέγματος της σήραγγας μέχρι τις 13 μοίρες είχαμε διδιάστατη αποκόλληση της ροής και από τις 14 μοίρες και άνω άρχισε η αποκόλληση να γίνεται τριδιάστατη. Δηλαδή με λίγα λόγια στις τρεις διαστάσεις η αποκόλληση της ροής για τη σήραγγα αρχίζει σε μία μοίρα μικρότερη (14 μοίρες) από ότι στο πλέγμα 50 χορδών που αρχίζει στις 15 μοίρες.

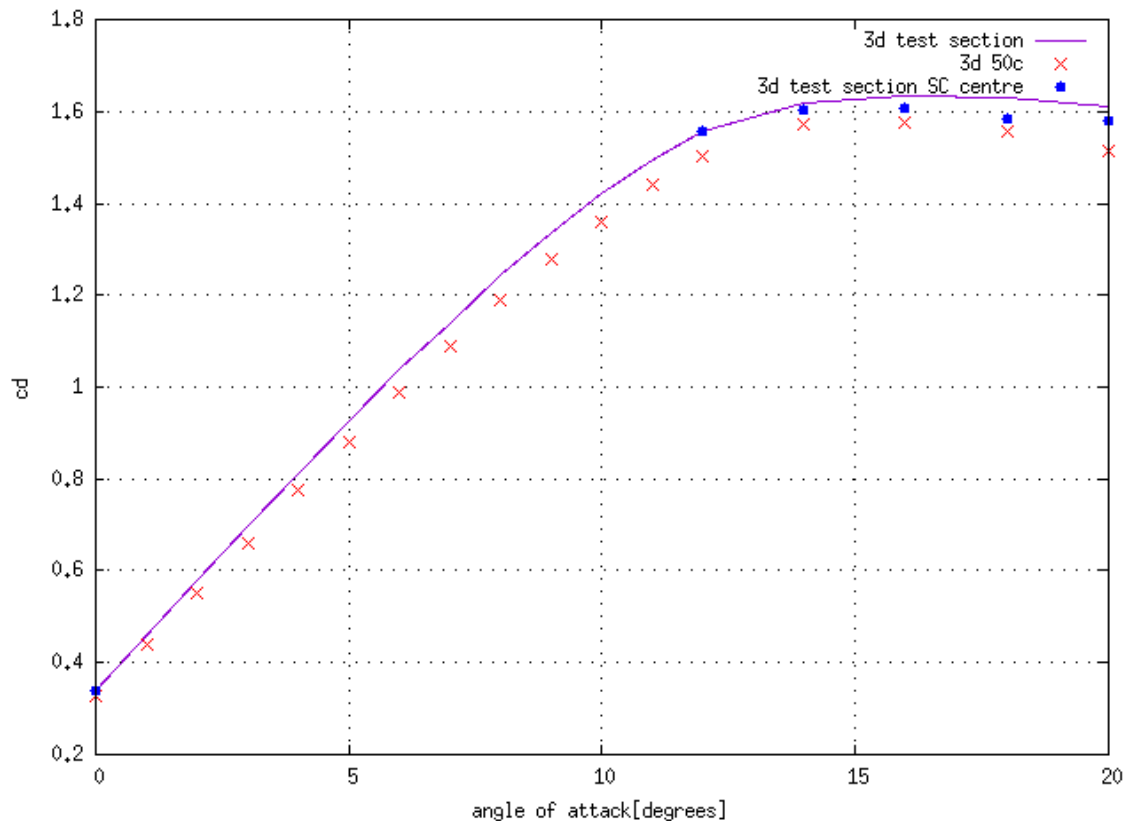
3.4.3 Σύγκριση μεταξύ των πλεγμάτων σήραγγας και 50 χορδών στις τρεις διαστάσεις

3.4.3.1 Περιγραφή

Αφού δημιουργήθηκε το πλέγμα και υπολογίστηκαν οι συντελεστές c_l, c_d και για το πλέγμα 50 χορδών και για το πλέγμα της σήραγγας στις τρεις διαστάσεις, επόμενο βήμα είναι να μελετήσουμε την επίδραση των τοιχωμάτων της αεροσήραγγας στις τρεις διαστάσεις. Ύστερα θα εφαρμόσουμε τις διορθώσεις στα μεγέθη που υπολογίζονται μέσα στη σήραγγα για τη περίπτωση του τριδιάστατου πλέγματος. Τέλος μπορούμε σε κάποιες γωνίες πρόσπτωσης να συγκρίνουμε τη δομή των στροβίλων καθ' όλο το εκπέτασμα της πτέρυγας των δύο πλεγμάτων.

3.4.3.2 Αποτελέσματα

Παρακάτω φαίνεται το διάγραμμα των συντελεστών άνωσης και αντίστασης συναρτήσει της γωνίας πρόσπτωσης των δύο περιπτώσεων, δηλαδή του τριδιάστατου πλέγματος των 50 χορδών και του τριδιάστατου πλέγματος της σήραγγας.

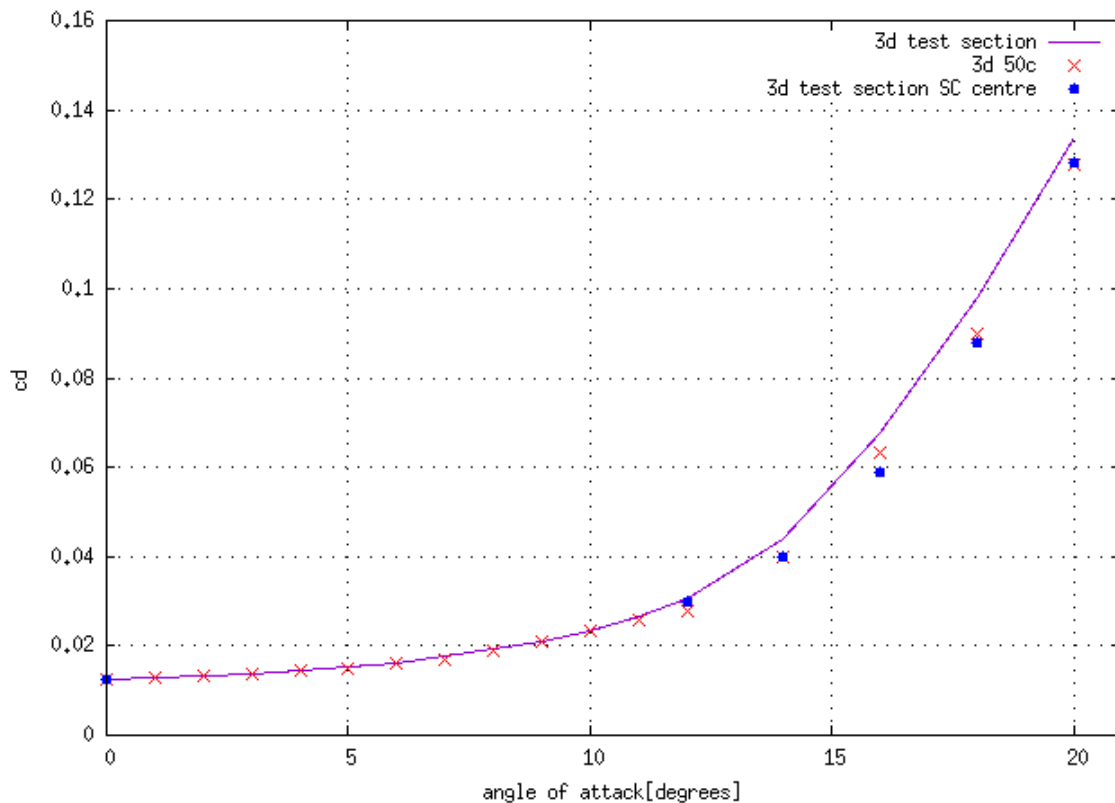


Εικόνα 3.4.15-Διάγραμμα συντελεστή άνωσης συναρτήσει γωνίας πρόσπτωσης για τη πτέρυγα μέσα στη σήραγγα(όνομα '3d test section'), εκτεθειμένη σε ελεύθερο ρεύμα αέρα (όνομα '3d 50c') και για τη πτέρυγα όπου ο συντελεστής άνωσης είναι υπολογισμένος στο κέντρο του stall cell (όνομα 'test section at SC centre').

Παρατηρούμε πως η καμπύλη η οποία αντιστοιχεί στο συντελεστή άνωσης του κέντρου του stall cell με όνομα '3d test section SC centre' είναι πιο κοντά στη καμπύλη του πλέγματος των 50 χορδών(όνομα '3d 50c') απ' ότι η καμπύλη του πλέγματος μέσα στη σήραγγα με όνομα '3d test section'.

Εδώ να πούμε πως η διαφορά των καμπυλών με όνοματα '3d test section' και '3d test section SC centre' είναι η εξής: Όσον αφορά τη καμπύλη με όνομα '3d test section' αυτή έχει υπολογιστεί λαμβάνοντας τον μέσο συντελεστή άνωσης σε κάθε γωνία πρόσπτωσης, δηλαδή τη μέση τιμή που έχει κατά μήκος του εκπετάσματος της πτέρυγας, ενώ η καμπύλη με όνομα '3d test section SC centre' έχει υπολογιστεί λαμβάνοντας το συντελεστή άνωσης (και αντίστοιχα της αντίστασης στο επόμενο διάγραμμα) στο

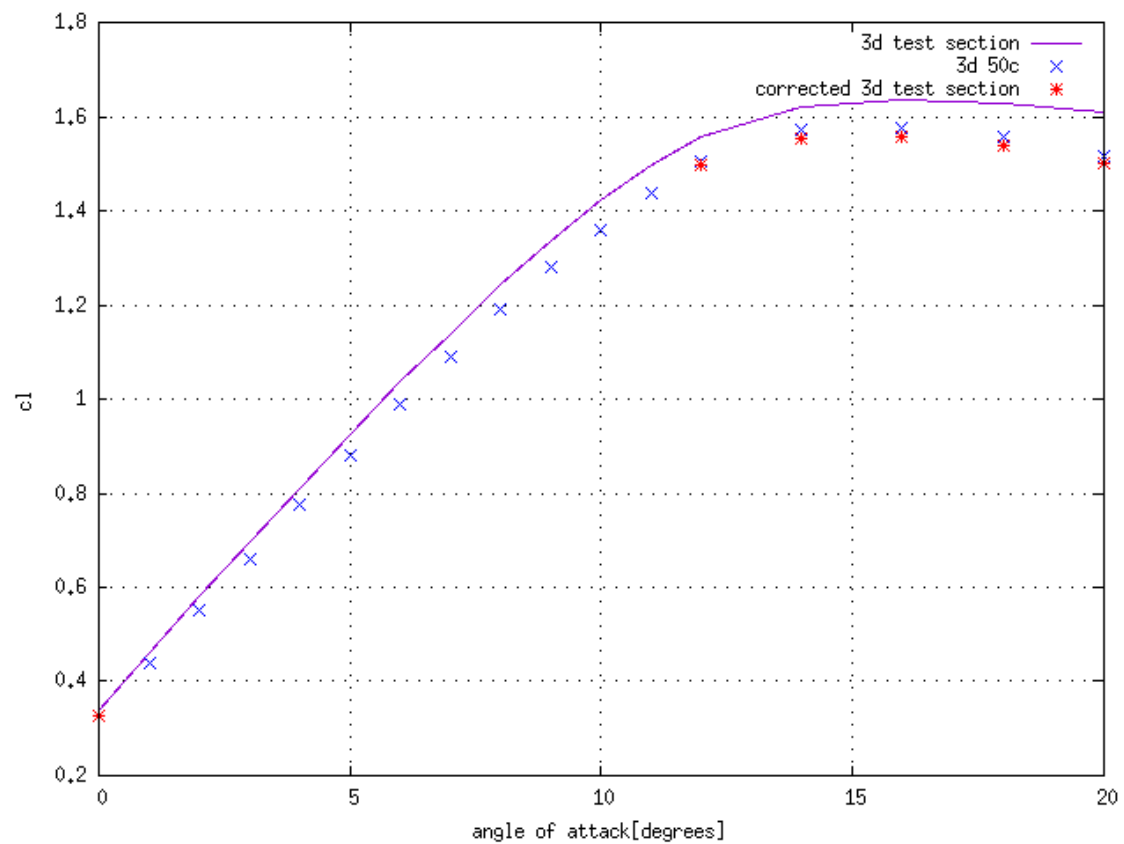
κέντρο του stall cell της πτέρυγας σε κάθε γωνία πρόσπτωσης.



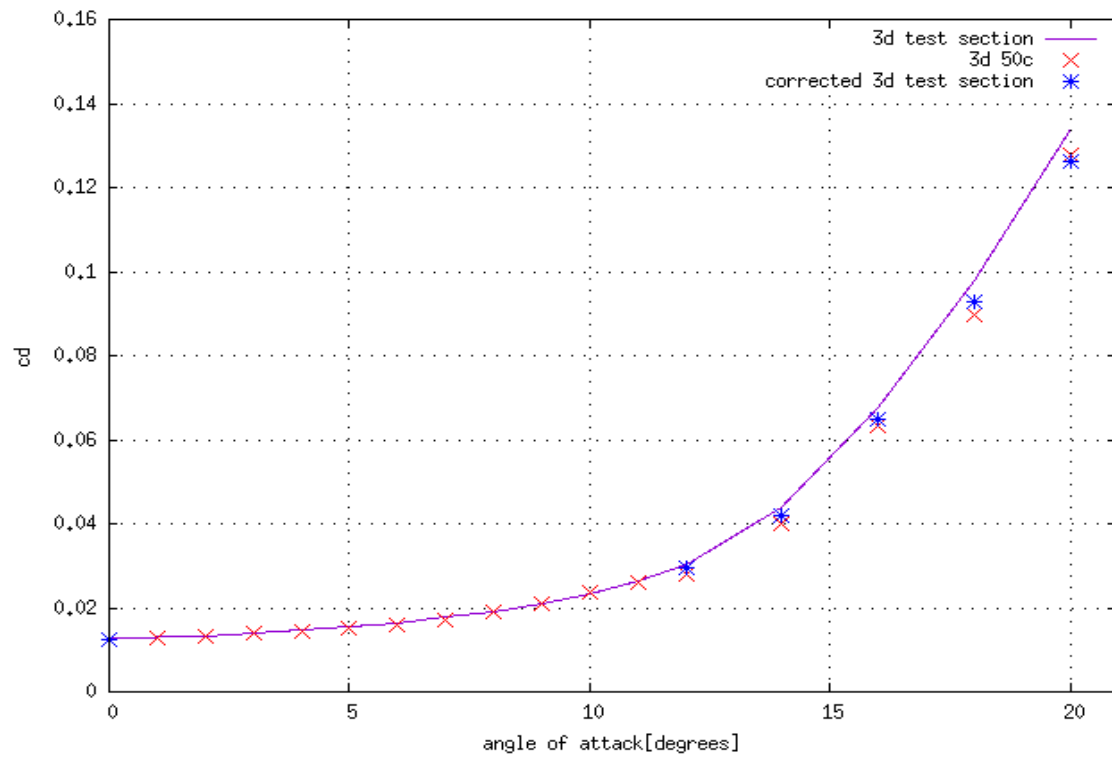
Εικόνα 3.4.16- Διάγραμμα συντελεστή αντίστασης συναρτήσει γωνίας πρόσπτωσης για τη πτέρυγα μέσα στη σήραγγα(όνομα '3d test section'), εκτεθειμένη σε ελεύθερο ρεύμα αέρα(όνομα '3d 50c') και για τη πτέρυγα όπου ο συντελεστής άνωσης είναι αυτός στο κέντρο του stall cell(όνομα 'test section at SC centre')

-Διόρθωση των αεροδυναμικών μεγεθών με βάση τους τύπους της θεωρίας

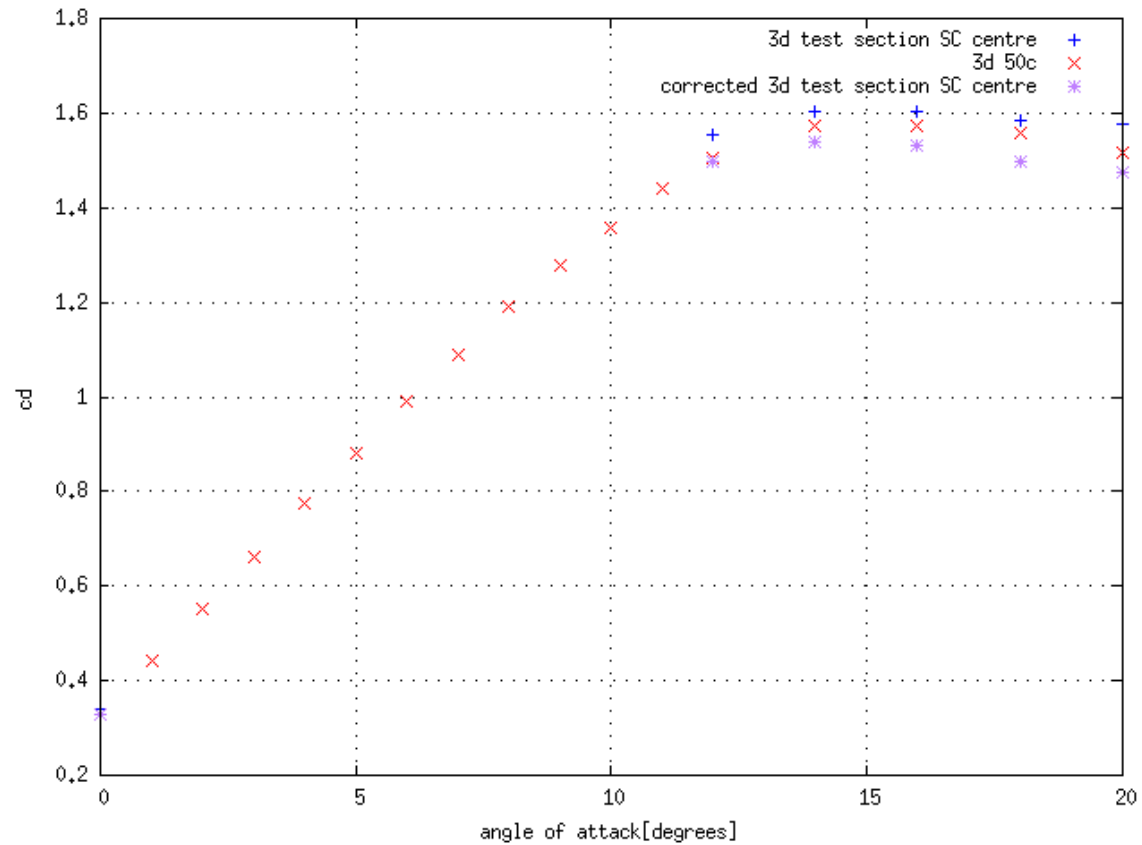
Ενδιαφέρον έχει να δούμε και την διόρθωση των συντελεστών άνωσης και αντίστασης στις τρεις διαστάσεις. Και επομένως να προκύψει η διορθωμένη καμπύλη συντελεστή άνωσης και αντίστασης συναρτήσει της γωνίας πρόσπτωσης. Σκοπός είναι να ελέγξουμε κατά πόσο οι διορθώσεις θα φέρουν την καμπύλη του πλέγματος της σήραγγας πιο κοντά στο πλέγμα των 50 χορδών. Εδώ θα εφαρμοστούν οι διορθώσεις δύο φορές. Θα γίνει μια διόρθωση στους συντελεστές άνωσης και αντίστασης όταν αυτοί είναι υπολογισμένοι στην θέση του κέντρου του stall cell και μία διόρθωση στους συντελεστές που έχουν υπολογιστεί ως μέσες τιμές κατά μήκος του εκπετάσματος της πτέρυγας. Έτσι έχουμε παρακάτω τα αντίστοιχα διαγράμματα:



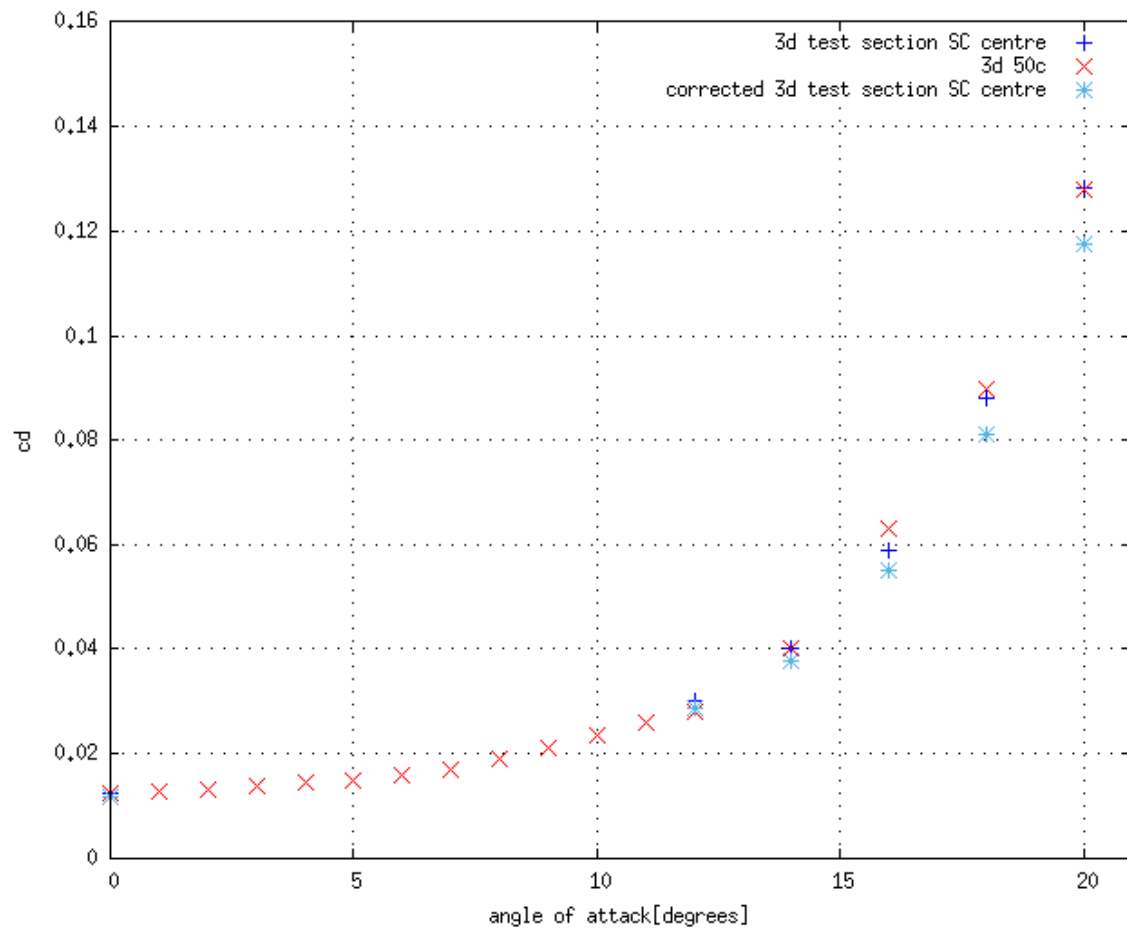
Εικόνα 3.4.17α-Διάγραμμα συντελεστή άνωσης συναρτήσει της γωνίας πρόσπτωσης. α) Η καμπύλη με όνομα '3d test section' αφορά το πλέγμα μέσα στη σήραγγα όπου έχουν ληφθεί οι μέσοι συντελεστές άνωσης κάθε πτέρυγας, β) η καμπύλη με όνομα '3d 50c' αφορά το πλέγμα μέσα στο υπολογιστικό χωρίο 50 χορδών, και γ) η καμπύλη με όνομα 'corrected 3d test section' έχει προκύψει με διόρθωση της καμπύλης με όνομα '3d test section'.



Εικόνα 3.4.17β- Διάγραμμα συντελεστή αντίστασης συναρτήσει της γωνίας πρόσπτωσης. α) Η καμπύλη με όνομα '3d test section' αφορά το πλέγμα μέσα στη σήραγγα όπου έχουν ληφθεί οι μέσοι συντελεστές αντίστασης κάθε πτέρυγας, β) η καμπύλη με όνομα '3d 50c' αφορά το πλέγμα μέσα στο υπολογιστικό χωρίο 50 χορδών, και γ) η καμπύλη με όνομα 'corrected 3d test section' έχει προκύψει με διόρθωση της καμπύλης με όνομα '3d test section'.



Εικόνα 3.4.17-Διάγραμμα συντελεστή άνωσης συναρτήσει της γωνίας πρόσπτωσης. α) Η καμπύλη με όνομα '3d test section SC centre' έχει προκύψει λαμβάνοντας τους συντελεστές άνωσης στο κέντρο του stall cell κάθε πτέρυγας, β) η καμπύλη με όνομα '3d 50c' αφορά το πλέγμα μέσα στο υπολογιστικό χωρίο 50 χορδών, και γ) η καμπύλη με όνομα 'corrected 3d test section SC centre' αποτελεί την διορθωμένη καμπύλη της καμπύλης με όνομα '3d test section SC centre'.



Εικόνα 3.4.176- Διάγραμμα συντελεστή αντίστασης συναρτήσει της γωνίας πρόσπτωσης. α) Η καμπύλη με όνομα '3d test section SC centre' έχει προκύψει λαμβάνοντας τους συντελεστές αντίστασης στο κέντρο του stall cell κάθε πτέρυγας, β) η καμπύλη με όνομα '3d 50c' αφορά το πλέγμα μέσα στο υπολογιστικό χωρίο 50 χορδών, και γ) η καμπύλη με όνομα 'corrected 3d test section SC centre' αποτελεί την διορθωμένη καμπύλη της καμπύλης με όνομα '3d test section SC centre'.

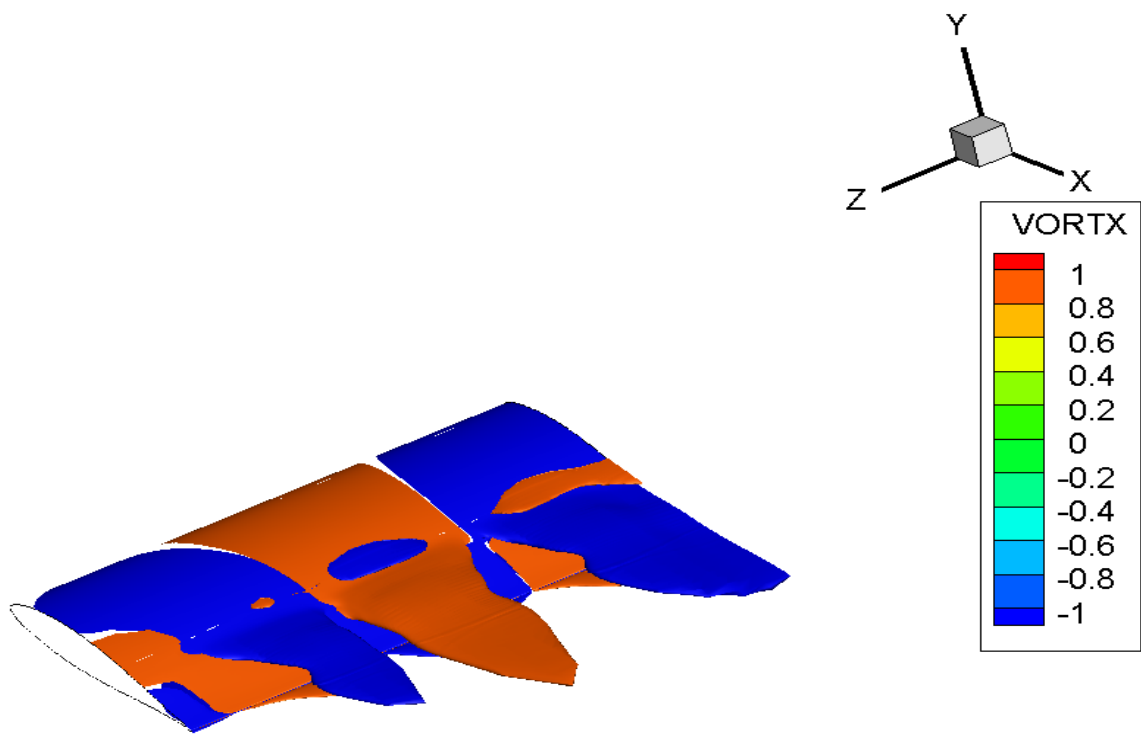
Το διάγραμμα της εικόνας 3.4.17α δίνει τον συντελεστή άνωσης συναρτήσει της γωνίας πρόσπτωσης με τρεις διαφορετικές καμπύλες. Η καμπύλη με όνομα '3d test section' αφορά το πλέγμα μέσα στη σήραγγα όπου έχουν ληφθεί οι μέσοι συντελεστές άνωσης σε κάθε γωνία πρόσπτωσης, η καμπύλη με όνομα '3d 50c' αφορά το πλέγμα με τη πτέρυγα εκτεθειμένη σε ελεύθερο ρεύμα αέρα και η καμπύλη με όνομα 'corrected 3d test section' αποτελεί την διορθωμένη καμπύλη της καμπύλης με όνομα '3d test section'. Το αντίστοιχο του συντελεστή αντίστασης φαίνεται στο διάγραμμα 3.4.17β. Η διορθωμένη καμπύλη είναι πιο κοντά στην καμπύλη '3d 50c'.

Αντίστοιχα τα ίδια παρατηρούμε στα διαγράμματα των εικόνων 3.4.17γ και 3.4.17δ με τη μόνο διαφορά πως η καμπύλη που αφορά το πλέγμα της σήραγγας και οπότε και η διορθωμένη καμπύλη της έχουν υπολογιστεί με τους συντελεστές άνωσης στο κέντρο του stall cell κάθε γωνίας πρόσπτωσης. Παρατηρείται πως η καμπύλη που αντιστοιχεί στους συντελεστές του κέντρου του stall cell είναι ακόμη πιο κοντά στη καμπύλη των 50 χορδών σε σύγκριση με τη καμπύλη που αντιστοιχεί στους μέσους συντελεστές.

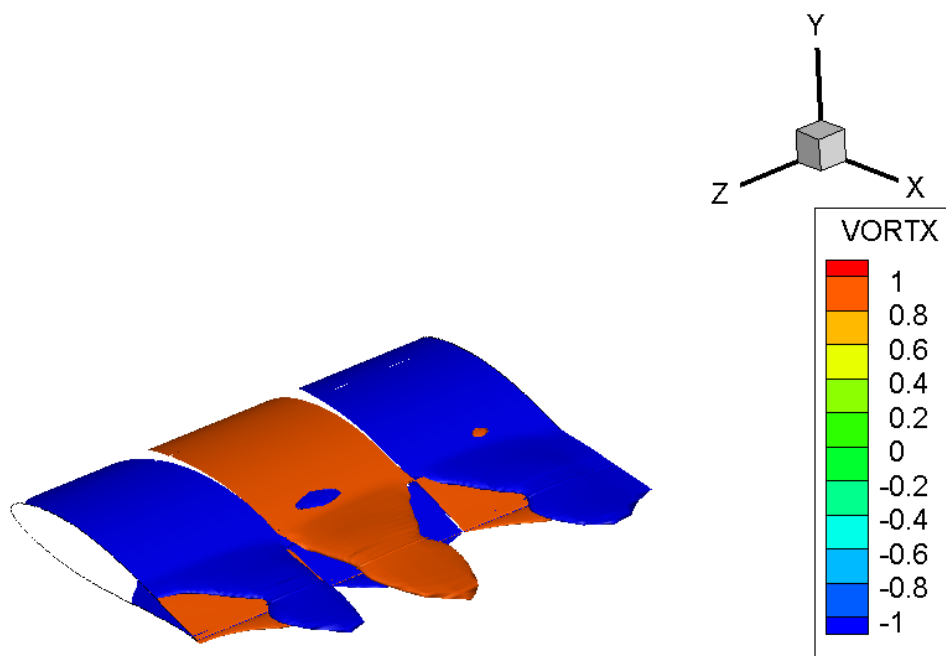
Δομή των στροβίλων κατά μήκος εκπετάσματος

Είπαμε πως η αποκόλληση της ροής αρχίζει πιο νωρίς στην περίπτωση του πλέγματος της σήραγγας, ενώ η αποκόλληση της ροής του πλέγματος 50 χορδών αρχίζει αργότερα.

Παρακάτω φαίνονται τα διαγράμματα του πλέγματος στις 50 χορδές (στις 15 μοίρες γωνία πρόσπτωσης) και του πλέγματος της σήραγγας (στις 14 μοίρες γωνία πρόσπτωσης), αντίστοιχα:



Εικόνα 3.4.18-Δομή στροβίλων για τη πτέρυγα που είναι εκτεθειμένη σε ελεύθερο ρεύμα αέρα και σε γωνία πρόσπτωσης 15 μοίρες.

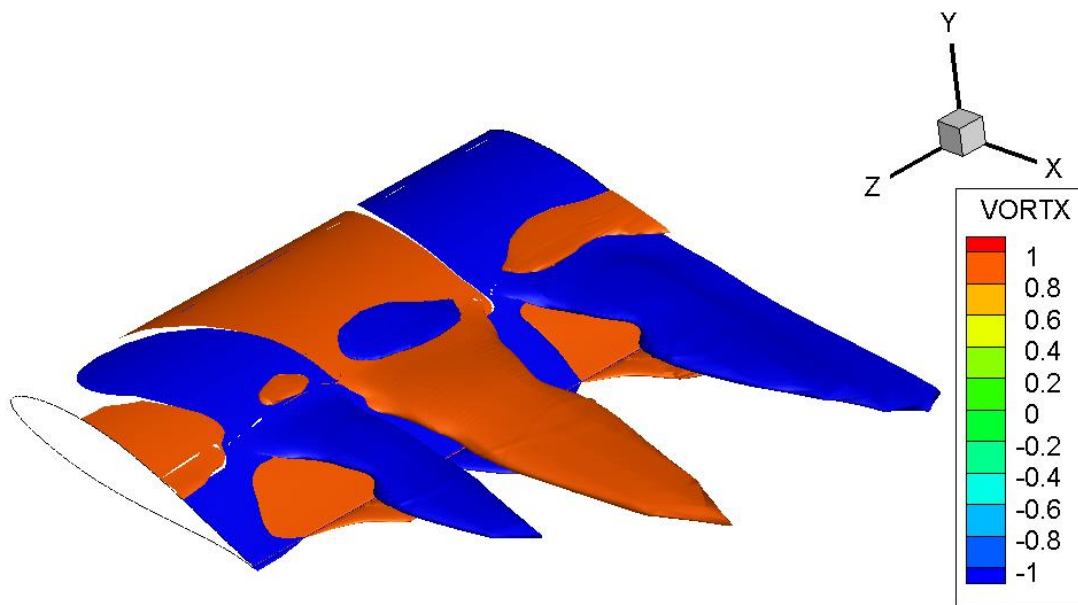


Εικόνα 3.4.19-Δομή στροβίλων για τη πτέρυγα που είναι μέσα στη σήραγγα σε γωνία πρόσπτωσης 14 μοίρες.

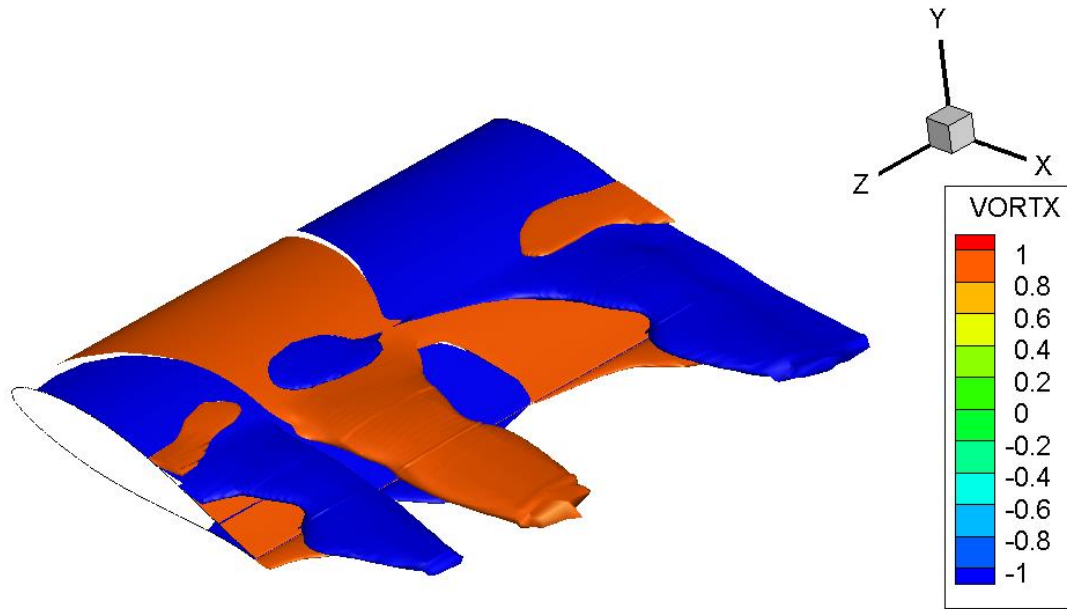
Παρατηρούμε πως στο πλέγμα των 50 χορδών η ύπαρξη των stall cells ξεκινά πιο έντονα και με στροβίλους πιο μεγάλους απο ότι στη περίπτωση του πλέγματος της σήραγγας. Αυτό βέβαια οφείλεται και στο γεγονός πως στη περίπτωση του πλέγματος της σήραγγας η αποκόλληση ξεκινά στις 14 μοίρες ,μικρότερη απ ότι στο πλέγμα 50c , αφού τα stall cells μεγαλώνουν καθώς αυξάνεται η γωνία πρόσπτωσης.

Μπορούμε να δούμε και τη συμπεριφορά των stall cells και σε άλλες γωνίες πρόσπτωσης και να τις συγκρίνουμε.

Παρακάτω φαίνεται το πλέγμα των 50 χορδών και της σήραγγας αντίστοιχα στις 16 μοίρες γωνία πρόσπτωσης:

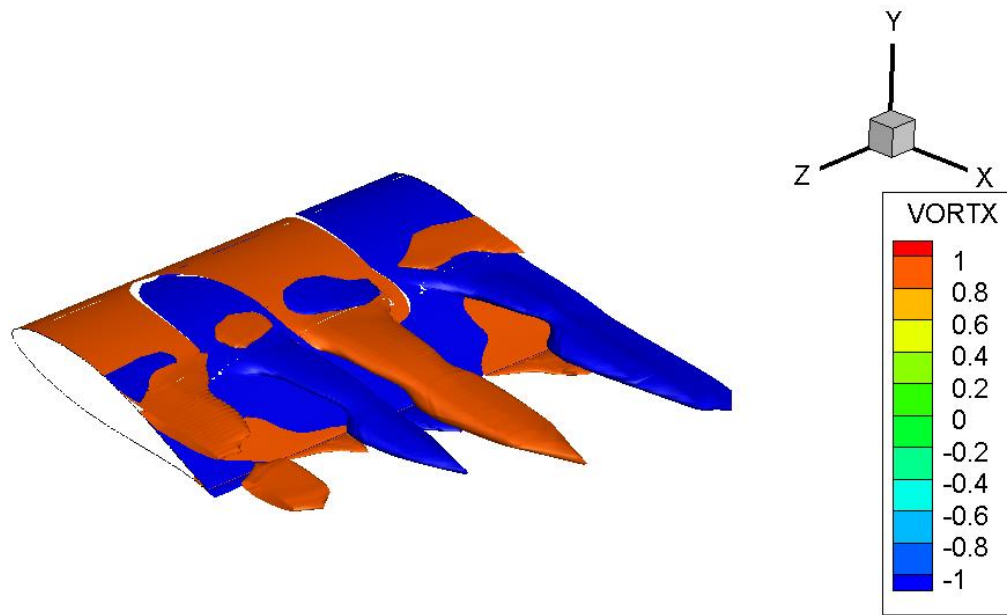


Εικόνα 3.4.20- Δομή στροβίλων για τη πτέρυγα που είναι εκτεθειμένη σε ελεύθερο ρεύμα αέρα και σε γωνία πρόσπτωσης 16 μοίρες.

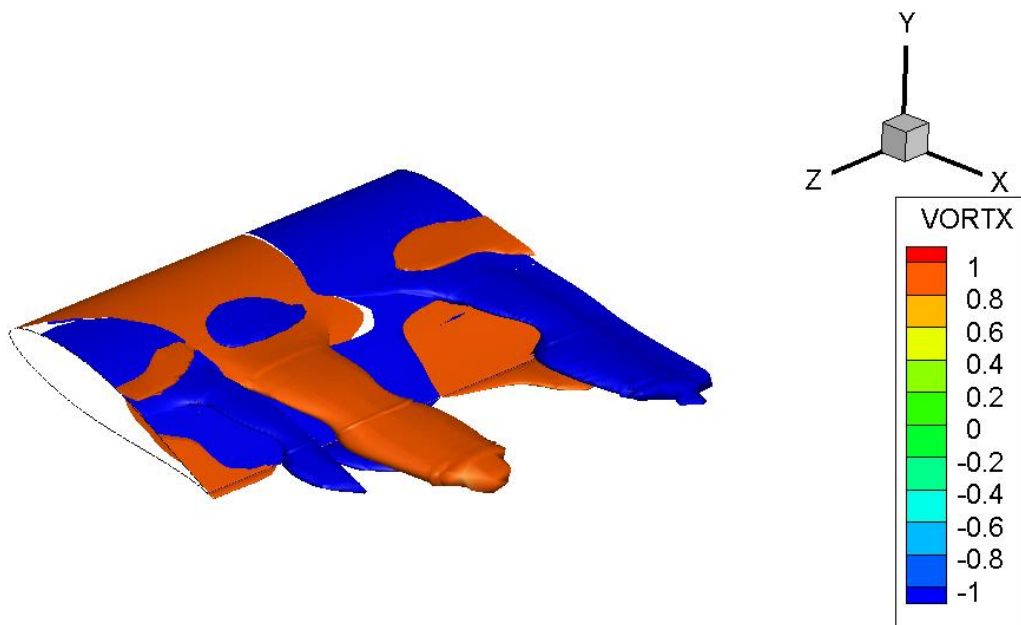


Εικόνα 3.4.21- Δομή στροβίλων για τη πτέρυγα που είναι μέσα στη σήραγγα σε γωνία πρόσπτωσης 16 μοίρες.

Στην περίπτωση του πλέγματος των 50 χορδών στις 16 μοίρες γωνία πρόσπτωσης παρατηρούμε την ύπαρξη ενός stall cell που αποτελείται από τον μεσαίο και άκρο δεξιό στρόβιλο και ενός μισού stall cell (στρόβιλος αριστερά). Ενώ στη περίπτωση του πλέγματος της σήραγγας έχουμε πάλι την ίδια δομή, δηλαδή ένα stall cell που αποτελείται από τον μεσαίο και δεξί στρόβιλο και ένα μισό stall cell (στρόβιλος αριστερά) με τη διαφορά πως το stall cell της σήραγγας είναι κοντύτερο από αυτό των 50 χορδών.



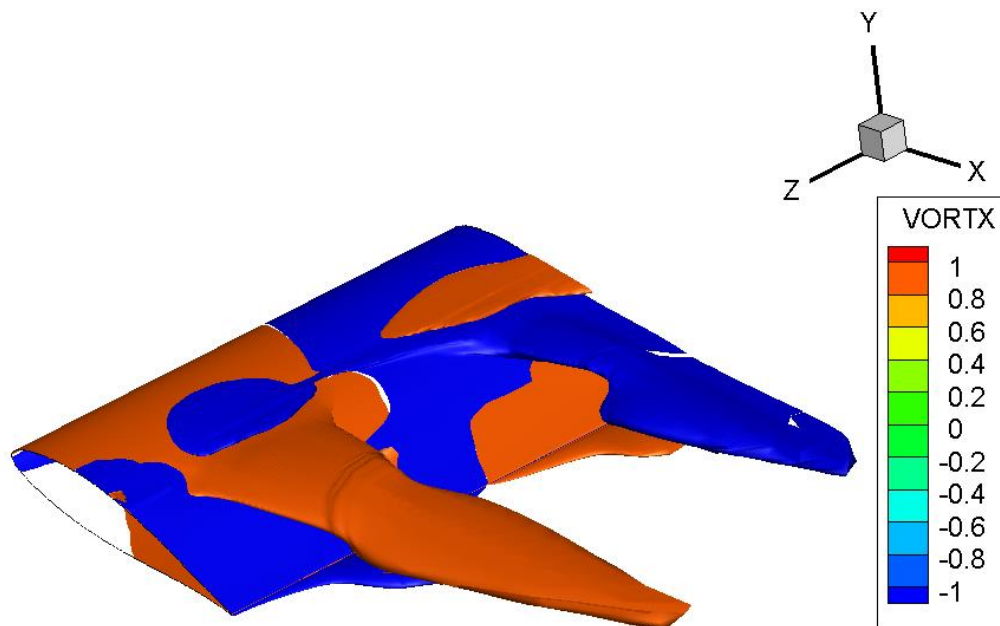
Εικόνα 3.4.22- Δομή στροβίλων για τη πτέρυγα που είναι εκτεθειμένη σε ελεύθερο ρεύμα αέρα και σε γωνία πρόσπτωσης 18 μοίρες.



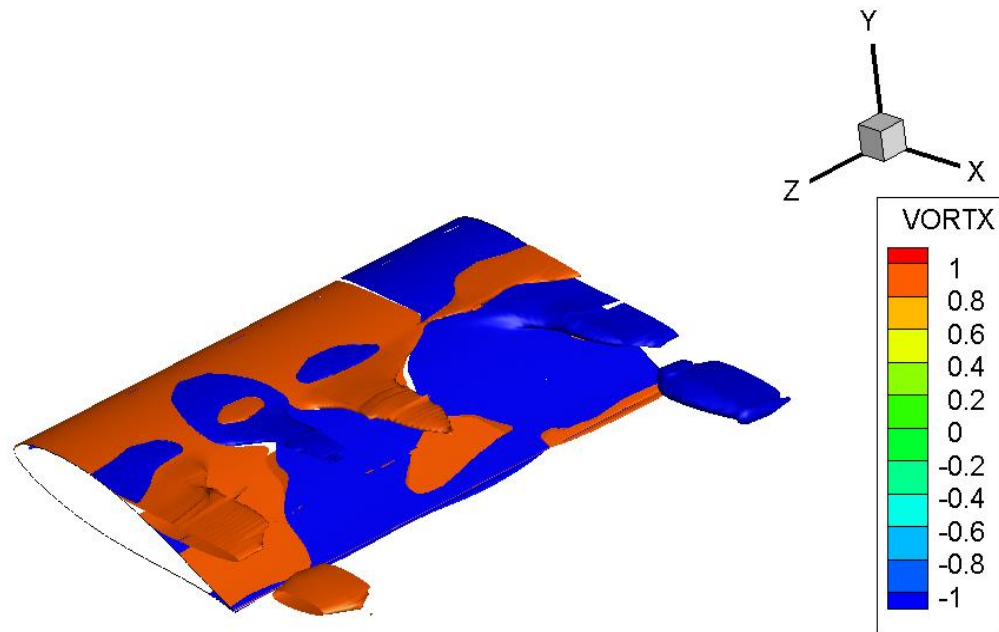
Εικόνα 3.4.23- Δομή στροβίλων για τη πτέρυγα που είναι μέσα στη σήραγγα σε γωνία πρόσπτωσης 18 μοίρες.

Παραπάνω διακρίνουμε στη περίπτωση του πλέγματος 50 χορδών την ύπαρξη δύο stall cells, ενώ στη περίπτωση του πλέγματος της σήραγγας παρατηρούμε την ύπαρξη ενός stall cell και ενός μισού.

Τέλος στις 20 μοίρες η δομή των stall cells για το πλέγμα 50 χορδών και το πλέγμα της σήραγγας αντίστοιχα



Εικόνα 3.4.24- Δομή στροβίλων για τη πτέρυγα που είναι εκτεθειμένη σε ελεύθερο ρεύμα αέρα και σε γωνία πρόσπτωσης 20 μοίρες.



Εικόνα 3.4.25- Δομή στροβίλων για τη πτέρυγα που είναι μέσα στη σήραγγα σε γωνία πρόσπτωσης 20 μοίρες.

3.4.3.3 Συμπεράσματα

Παρατηρώντας τα διαγράμματα συντελεστών άνωσης και αντίστασης συναρτήσει της γωνίας πρόσπτωσης, εξάγεται το συμπέρασμα πως η επίδραση των τοιχωμάτων πάνω στις μετρήσεις είναι σημαντική, κι αυτό μπορούμε να το παρατηρήσουμε στην απόσταση που έχουν οι καμπύλες 50 χορδών και σήραγγας στο διάγραμμα c_l -α αλλά και στο διάγραμμα c_d -α. Εφαρμόζοντας τους τυπους της θεωρίας η καμπύλη του πλέγματος της σήραγγας προσεγγίζει την καμπύλη 50 χορδών και μέχρι τις 12 μοίρες ταυτίζονται σχεδόν και στις μεγαλύτερες μοίρες πάλι βρίσκονται κοντά, που σημαίνει πως οι διορθώσεις που δίνει η θεωρία έχουν εγκυρότητα και στις τρεις διαστάσεις.

Επιπρόσθετα η δομή αλλά και το μέγεθος των στροβίλων διαφέρουν στις δύο περιπτώσεις. Ως προς τη δομή παρατηρούμε διαφορές στη μορφή και τη παρουσία των stall cells, αλλά και ως προς το μέγεθος παρατηρείται

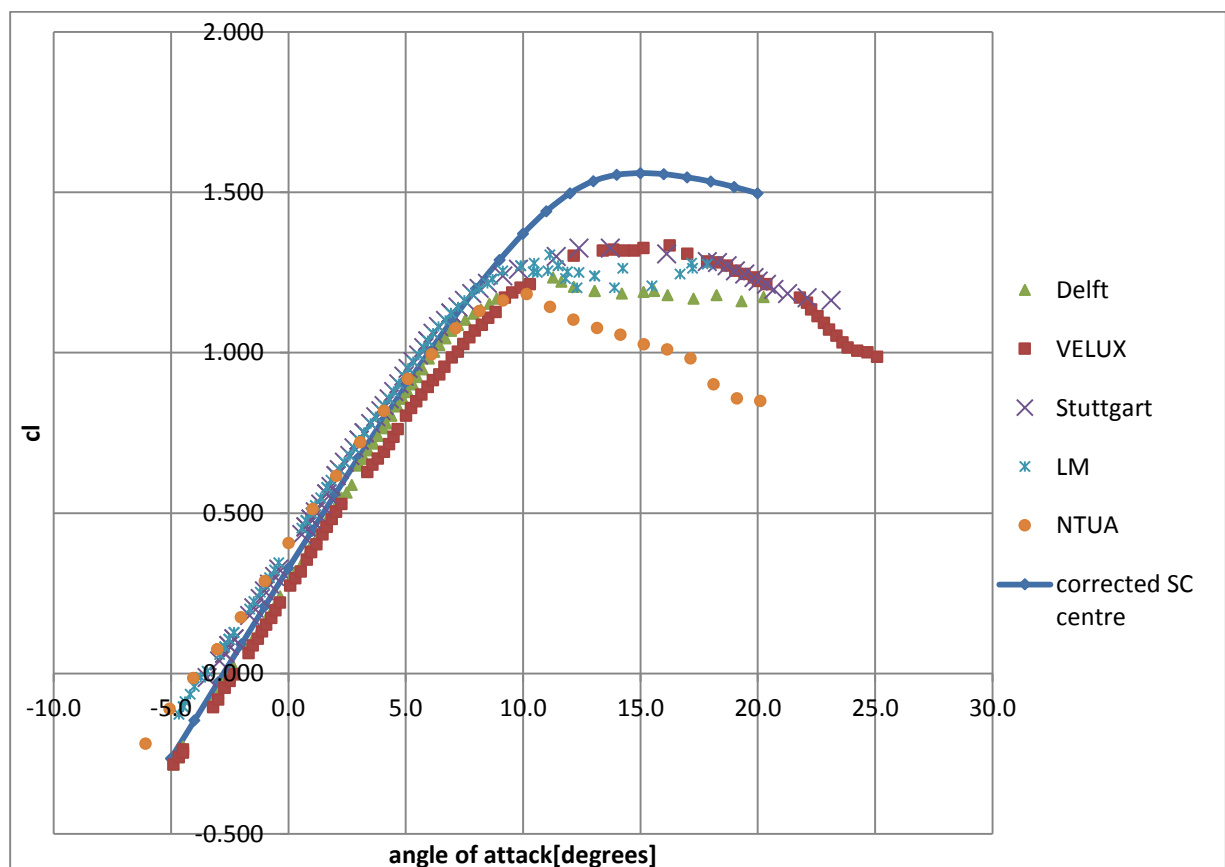
μεγαλύτερη έκταση των στροβίλων στο κατάντι τς πτέρυγας στη περίπτωση του πλέγματος 50 χορδών.

3.4.4 Σύγκριση με πειραματικά δεδομένα

3.4.4.1 Περιγραφή

Παρακάτω δίνεται το πολικό διάγραμμα του συντελεστή c_l όπως υπολογίστηκε πειραματικά στο εργαστήριο τόσο του ΕΜΠ όσο και άλλων εργαστηρίων του εξωτερικού. Σημαντική λοιπόν είναι η σύγκριση της υπολογιστικής καμπύλης όπως δημιουργήθηκε μέσω των προγραμμάτων με την πειραματική όπως προέκυψε από μετρήσεις στις συγκεκριμένες αεροσήραγγες.

3.4.4.2 Αποτελέσματα



Εικόνα 3.4.26-Διορθωμένη καμπύλη του συντελεστή άνωσης της σήραγγας σε σχέση με τις αντίστοιχες πειραματικές καμπύλες διάφορων αεροδυναμικών σήραγγων.

3.4.4.3 Συμπεράσματα

Η καμπύλη με όνομα 'corrected SC centre' είναι η καμπύλη που αντιστοιχεί στους συντελεστές άνωσης στο κέντρο του stall cell κάθε γωνίας και αποτελεί την υπολογιστική καμπύλη όπως προέκυψε με την μελέτη που έγινε. Η καμπύλη αυτή μέχρι την γωνία περίπου 10 μοιρών δίνει καλά αποτελέσματα συγκριτικά με τα πειραματικά, ενώ καθώς η γωνία πρόσπτωσης της αεροτομής μεγαλώνει η υπολογιστική καμπύλη απομακρύνεται από την πειραματική.

Κεφάλαιο 4 Συμπεράσματα

Σκοπός της παρούσας διπλωματικής εργασίας ήταν η μελέτη της επίδρασης των τοιχωμάτων της αεροσήραγγας πάνω στις αεροδυναμικές μετρήσεις στις δύο αλλά και στις τρεις διαστάσεις, ώστε να δημιουργηθεί ένα πολύτιμο εργαλείο που θα υπολογίζει τα αεροδυναμικά μεγέθη σε μια αεροτομή. Η αεροτομή που μελετήθηκε ήταν η NACA 63418.

Έπρεπε να δημιουργηθούν δύο πλέγματα. Ένα ήταν το πλέγμα που υπολογίζει τα αεροδυναμικά μεγέθη πάνω στην αεροτομή όταν αυτή είναι ελεύθερη στον διερχόμενο αέρα, και ένα πλέγμα που υπολογίζει τα αεροδυναμικά μεγέθη πάνω στην αεροτομή όταν αυτή είναι μέσα στην αεροσήραγγα. Συγκρίνοντας τα δύο πλέγματα προέκυψαν χρήσιμα συμπεράσματα. Αρχικώς δημιουργήθηκε το πολικό διάγραμμα για το πλέγμα 50 χορδών. Ως προς την κατασκευή του το πλέγμα ήταν 0-type και επιλέχθηκε αυτό με μέγεθος υπολογιστικού χωρίου ίσο με 50 φορές την χορδή της αεροτομής. Εξετάζοντας την ανεξαρτησία του πλέγματος καταλήξαμε ότι το πλέγμα θα έχει 60500 ορθογωνικά κελιά. Στη συνέχεια για το πλέγμα της σήραγγας η στρατηγική που ακολουθήθηκε ως προς την δομή και το μέγεθος των κελιών ήταν ως εξής. Ως προς τη δομή ελέγχθηκαν δύο είδη πλεγμάτων, ένα με τριγωνικά κελιά και ένα με ορθογωνικά κελιά. Προτιμήθηκε αυτό με τα ορθογωνικά κελιά και αριθμού

44644. Στη συνέχεια μελετήθηκε η παρουσία οριακού στρώματος πάνω στα τοιχώματα, και η παρουσία του συγκλίνοντος και αποκλίνοντος τμήματος της σήραγγας. Διαπιστώθηκε πως η ύπαρξη οριακού στρώματος δεν είναι απαραίτητη μιας και η παρουσία της δεν επηρεάζει τα αποτελέσματα. Όμοια το ίδιο διαπιστώθηκε για το συγκλίνον τμήμα αλλά και το αποκλίνον. Εδώ να σημειωθεί πως το σχετικό σφάλμα μεταξύ των συντελεστών άνωσης για τις περιπτώσεις που η αεροτομή ήταν μόνο στο θάλαμο δοκιμών και στην άλλη με την παρουσία του κάθε τμήματος ήταν μικρότερο της μονάδας. Το σφάλμα όμως του συντελεστού αντίστασης προέκυψε και για τα δύο τμήματα μεγαλύτερο της μονάδας. Ο λόγος είναι ότι οι απόλυτες διαφορές διαιρούνται με πολύ μικρές τιμές. Επίσης τα διαγράμματα κατανομής της πίεσης έδειξαν πως δεν υπάρχει μεταβολή του συντελεστή c_p γύρω από την αεροτομή με και χωρίς την ύπαρξη των εν λόγω τμημάτων. Επομένως το πλέγμα της αεροσήραγγας αντιπροσωπεύεται με το τμήμα του θαλάμου δοκιμών. Τα πολικά διαγράμματα των δύο αναφερθέντων περιπτώσεων έδωσαν τις εξής πληροφορίες:

1. Όσον αφορά το διάγραμμα cl - α μέχρι τη μία μοίρα οι δύο καμπύλες ταυτίζονται, ενώ καθώς αυξάνεται η γωνία πρόσπτωσης απομακρύνονται μεταξύ τους.

2. Όσον αφορά το διάγραμμα cd - α ταυτίζονται οι δύο καμπύλες μέχρι και τις 12 μοίρες και στη συνέχεια απομακρύνονται.

Το πλέγμα των 50 χορδών δίνει σε γωνία πρόσπτωσης 15 μοίρες μέγιστο συντελεστή cl ίσο με $cl_{max}=1.587$, ενώ το πλέγμα της σήραγγας δίνει σε γωνία 16 μοίρες μέγιστο συντελεστή cl ίσο με $cl_{max}=1.634$.

Στη συνέχεια εφαρμόζοντας τους τύπους της θεωρίας που διορθώνουν τα αεροδυναμικά μεγέθη προέκυψε το πολικό διάγραμμα με τους διορθωμένους συντελεστές cl , cd το οποίο έδωσε μικρότερες αριθμητικές διαφορές με το πλέγμα των 50 χορδών. Εξάγεται το συμπέρασμα πως οι τύποι της θεωρίας προσεγγίζουν επαρκώς την καμπύλη των 50 χορδών στις δύο διαστάσεις. Ύστερα συνεχίστηκε η μελέτη στις τρεις διαστάσεις.

Τα πολικά διαγράμματα των τριδιάστατων πλεγμάτων 50 χορδών και, πλέγματος της σήραγγας μας έδωσαν τις εξής χρήσιμες πληροφορίες. Όσον αφορά το πλέγμα της σήραγγας παρατηρήθηκε πως μέχρι τις 13 μοίρες ταυτίζεται με το αντίστοιχο διδιάστατο πλέγμα και στις 14 μοίρες αρχίζουν φαινόμενα αποκόλλησης. Το τριδιάστατο πλέγμα 50 χορδών έδωσε διδιάστατη αποκόλληση της ροής μέχρι την γωνία πρόσπτωσης 14 μοιρών, και από τις 15 μοίρες και σε ανώτερες από αυτήν γωνίες παρουσιάζονται φαινόμενα τριδιάστατης αποκόλλησης.

Σύγκριση πλέγματος σήραγγας- πλέγματος 50 χορδών στις τρεις διαστάσεις

Η σύγκριση μεταξύ των πολικών διαγραμμάτων των πλεγμάτων σήραγγας και 50 χορδών έδειξε πως η επίδραση των τοιχωμάτων είναι αρκετά σημαντική στη περίπτωση των τριών διαστάσεων σε σχέση με τις δύο διαστάσεις που είναι σαφώς μικρότερη. Η διαφορά μεταξύ των καμπυλών αυτών είναι πιο μικρή στις γωνίες που η αποκόλληση της ροής είναι διδιάστατη, ενώ στις γωνίες που εμφανίζεται τριδιάστατη αποκόλληση η διαφορά αυτή μεγαλώνει. Αυτό οφείλεται φυσικά και στην εμφάνιση των stall cells που δημιουργούνται στην πτέρυγα λόγω των τριδιάστατων φαινομένων. Εδώ να αναφερθεί πως η παραπάνω σύγκριση έγινε με το πλέγμα της σήραγγας να αφορά τους μέσους συντελεστές άνωσης και αντίστασης. Ελέγχθηκε επίσης και η περίπτωση της καμπύλης που αφορά το πλέγμα της σήραγγας με τους συντελεστές άνωσης και αντίστασης υπολογισμένους στο κέντρο των stall cells σε κάθε γωνία πρόσπτωσης. Αυτή η καμπύλη ήταν πιο κοντά στη καμπύλη των 50 χορδών.

Διορθώσεις στις τρεις διαστάσεις

Εφαρμόζοντας τους τύπους της θεωρίας παρατηρήθηκε πως η διορθωμένη καμπύλη $cl-\alpha$ και $cd-\alpha$ πλησίασε την αντίστοιχη καμπύλη του πλέγματος των 50 χορδών. Οι διορθωμένες καμπύλες τόσο όταν παίρνουμε τους μέσους συντελεστές άνωσης και αντίστασης όσο και αυτούς στο κέντρο των stall cells προσεγγίζουν την καμπύλη των 50 χορδών.

Σύγκριση με πειράματα

Σημαντική ήταν και η σύγκριση των αποτελεσμάτων που εξήχθησαν με αυτά που έδωσαν πειραματικά οι μετρήσεις στην αεροσήραγγα του ΕΜΠ, καθώς επίσης και με τις μετρήσεις που έδωσαν και άλλες αεροσήραγγες του εξωτερικού. Η διορθωμένη υπολογιστική καμπύλη είναι πιο κοντά στην πειραματική σε γωνίες πρόσπτωσης μέχρι 10 μοίρες, ενώ σε μεγαλύτερες απομακρύνεται από αυτήν.

ΜΕΛΛΟΝΤΙΚΗ ΕΡΕΥΝΑ

Κλείνοντας αυτό το κεφάλαιο και την παρουσίαση της εργασίας αυτής, η μελλοντική έρευνα θα μπορούσε να περιλαμβάνει τα εξής στάδια:

- Να πραγματοποιηθεί μελέτη και για άλλες αεροτομές, ώστε το εργαλείο που κατασκευάστηκε να έχει μεγαλύτερο εύρος λειτουργίας.
- Να χρησιμοποιηθούν και άλλα μοντέλα τύρβης, όπως το μοντέλο k-e.

Βιβλιογραφία

Περιβολάρης, Ιωάννης, "Υπολογιστική και θεωρητική ανάλυση της αεροδυναμικής συμπεριφοράς πτερυγίων δρομέα με χρήση δεσμών αέρα", 2004.

<http://link.springer.com/article/10.1007/s00348-016-2215-8>

Jewel B. Barlow, William H. Rae, Jr., Alan Pope, *Low-speed wind tunnel testing*, 3d edition, March 1999.